

Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/JP05/003345

International filing date: 28 February 2005 (28.02.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: JP
Number: 2004-052823
Filing date: 27 February 2004 (27.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 28 April 2005 (28.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

日本国特許庁
JAPAN PATENT OFFICE

02.3.2005

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

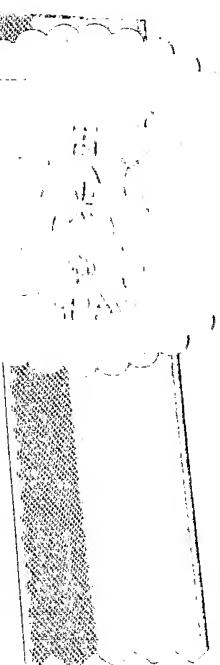
This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日
Date of Application: 2004年 2月 27日

出願番号
Application Number: 特願 2004-052823

パリ条約による外国への出願に用いる優先権の主張の基礎となる出願の国コードと出願番号
The country code and number of your priority application, to be used for filing abroad under the Paris Convention, is

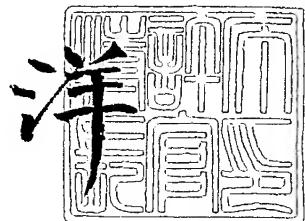
出願人
Applicant(s): 本田技研工業株式会社



2005年 4月 14日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小川



【書類名】 特許願
【整理番号】 PSK72301HW
【提出日】 平成16年 2月27日
【あて先】 特許庁長官殿
【国際特許分類】 B25J 5/00
 G05D 1/02

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 竹中 透

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 松本 隆志

【発明者】
【住所又は居所】 埼玉県和光市中央1丁目4番1号 株式会社本田技術研究所内
【氏名】 吉池 孝英

【特許出願人】
【識別番号】 000005326
【氏名又は名称】 本田技研工業株式会社

【代理人】
【識別番号】 100077805
【弁理士】
【氏名又は名称】 佐藤 辰彦

【選任した代理人】
【識別番号】 100077665
【弁理士】
【氏名又は名称】 千葉 剛宏

【手数料の表示】
【予納台帳番号】 015174
【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1
【包括委任状番号】 9711295

【書類名】特許請求の範囲

【請求項 1】

- 1) 所定の作用点とその点まわりに発生する床反力モーメントの目標値および／または許容範囲を設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、
- 2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差を時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で各時刻 t において前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分 $M2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で時刻 t における前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分 $M1(t)$ との差を、または前記 $M2(t)$ と時刻 t における前記目標床反力モーメントとの差を、時刻 t における床反力モーメント成分誤差 $Merr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、
- 3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $Merr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力が、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、前記所定の作用点とその点まわりに発生する目標床反力モーメントと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、を備えたことを特徴とする移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項 2】

- 1) 目標ZMPを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、
- 2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差を時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で前記目標ZMPまわりに発生する各時刻 t における床反力モーメント成分 $M2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力モーメント成分 $M1(t)$ との差を、または前記 $M2(t)$ の水平成分あるいは床面平行成分を、時刻 t における床反力モーメント成分誤差 $Merr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、
- 3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $Merr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力が、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、

を備えたことを特徴とする移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項 3】

- 1) 目標ZMPを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、
- 2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と、前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差を時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動から第2の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPたる $ZMP2(t)$ と前記仮生成した目標運動から第1の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPたる $ZMP1(t)$ との差を、また

は前記ZMP2 (t) そのものを、ZMP誤差ZMPerr (t) として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力および第2の動力学モデル上で算出されるZMPに近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力および第1の動力学モデル上で算出されるZMPを少なくとも前記Ferr (t) の時系列と前記ZMPerr (t) の時系列とを用いて修正してなる床反力およびZMPが、ZMPに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、

を備えたことを特徴とする移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項4】

1) 所定の作用点とその点まわりに発生する床反力モーメントの目標値および／または許容範囲と床反力並進力成分の目標値および／または許容範囲とを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、

2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻tにおける床反力並進力成分F2 (t) と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻tにおける床反力並進力成分F1 (t) との差を、または、前記F2 (t) と時刻tにおける前記床反力並進力成分の目標値との差を、時刻tにおける床反力並進力成分誤差Ferr (t) として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で各時刻tにおいて前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分M2 (t) と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で時刻tにおける前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分M1 (t) との差を、または、前記M2 (t) と時刻tにおける前記目標床反力モーメントとの差を、時刻tにおける床反力モーメント成分誤差Merr (t) として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記Ferr (t) の時系列と前記Merr (t) の時系列とを用いて修正してなる床反力が、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、前記所定の作用点とのその点まわりに発生する目標床反力モーメントと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、を備えたことを特徴とする移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項5】

1) 目標ZMPと床反力並進力成分の目標値および／または許容範囲とを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、

2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻tにおける床反力並進力成分F2 (t) と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻tにおける床反力並進力成分F1 (t) との差、または、前記F2 (t) と時刻tにおける前記床反力並進力成分の目標値との差を、時刻tにおける床反力並進力成分誤差Ferr (t) として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で前記目標ZMPまわりに発生する各時刻tにおける床反力モーメント成分M2 (t) と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻tにおける床反力モーメント成分M1 (t) との差を、または、前記M2 (t) の水平成分あるいは床面平行成分を、時刻tにおける床反力モーメント成分誤差Merr (t) として求め、それを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記Ferr (t) の時系列と前記Merr (t) の時系列とを用いて修正してなる床反力が

、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、
を備えたことを特徴とする移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項6】

1) 目標ZMPと床反力並進力成分の目標値および／または許容範囲とを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、

2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻tにおける床反力並進力成分F2(t)と、前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻tにおける床反力並進力成分F1(t)との差、または、前記F2(t)と時刻tにおける前記床反力並進力成分の目標値との差を、時刻tにおける床反力並進力成分誤差Ferr(t)として求めると共に、前記仮生成した目標運動から第2の動力学モデル上で算出される各時刻tにおけるZMPたるZMP2(t)と前記仮生成した目標運動から第1の動力学モデル上で算出される各時刻tにおけるZMPたるZMP1(t)との差を、または、前記ZMP2(t)そのものを、ZMP誤差ZMPerr(t)として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力および第2の動力学モデル上で算出されるZMPに近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力および第1の動力学モデル上で算出されるZMPを少なくとも前記Ferr(t)の時系列と前記ZMPerr(t)の時系列とを用いて修正してなる床反力およびZMPが、ZMPに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、

を備えたことを特徴とする移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項7】

前記歩容修正手段は、修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で、各時刻tにおける修正された目標歩容の所定の作用点まわりに発生する床反力モーメントに、時刻tにおける前記求めた床反力モーメント誤差Merr(t)または該Merr(t)に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力モーメントが、時刻tにおける修正された目標歩容の目標床反力モーメントに略一致し、かつ、時刻tにおける修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で発生する床反力並進力成分に、時刻tにおける前記求めた床反力並進力成分誤差Ferr(t)または該Ferr(t)に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力並進力成分が、時刻tにおける修正された目標歩容の所定の床反力並進力成分許容範囲内になること、および／または所定の床反力並進力成分値に一致することを概ね満足するように、前記所定期間の修正された目標歩容を生成することを特徴とする請求項1または4記載の移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項8】

前記歩容修正手段は、修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で、各時刻tにおける修正された目標歩容の目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントに、時刻tにおける前記求めた床反力モーメント誤差Merr(t)または該Merr(t)に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力モーメントの水平成分あるいは床面平行成分が略0となり、かつ、時刻tにおける修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で発生する床反力並進力成分に、時刻tにおける前記求めた床反力並進力成分誤差Ferr(t)または該Ferr(t)に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力並進力成分が、時刻tにおける修正された目標歩容の所定の床反力並進力成分許容範囲内になること、および／または所定の床反力並進力成分値に一致することを概ね満足するように、前記所定期間の修正された目標歩容を生成することを特徴とする請求項2または5記載の移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項9】

前記歩容修正手段は、修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPに、前記求めた時刻 t におけるZMP誤差ZMPerr (t) または該ZMPerr (t) に所定の乗数を乗じたものを加えたZMPが、時刻 t における修正された目標歩容の目標ZMPに略一致し、かつ、時刻 t における修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で発生する床反力並進力成分に、時刻 t における前記求めた床反力並進力成分誤差Ferr (t) または該Ferr (t) に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力並進力成分が、時刻 t における修正された目標歩容の所定の床反力並進力成分許容範囲内になること、および／または所定の床反力並進力成分値に一致することを概ね満足するように、前記所定期間の修正された目標歩容を生成することを特徴とする請求項3または6記載の移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項10】

前記移動ロボットは、上体から延設された複数の脚体を有する脚式移動ロボットであり、前記第1の動力学モデルは、前記各脚体先端部の運動をそれぞれ各脚体に対応する質点の運動により表し、前記上体の並進運動を該上体に対応する質点の並進運動で表し、該移動ロボットの所定の部位の姿勢変化運動をフライホイールの回転運動により表すモデルであることを特徴とする請求項1～9のいずれか1項に記載の移動ロボットの歩容生成装置。

【請求項11】

第1の動力学モデルは、少なくとも前記移動ロボットの上体の並進運動と該上体の姿勢変化運動とを含む運動と床反力の関係を表すモデルであることを特徴とする請求項1～10のいずれか1項に記載の移動ロボットの歩容生成装置。

【書類名】明細書

【発明の名称】移動ロボットの歩容生成装置

【技術分野】

【0001】

本発明は2足移動ロボット等の目標歩容を生成する装置に関する。

【背景技術】

【0002】

2足移動ロボット等の移動ロボットの目標歩容を生成する技術としては、例えば特許第3443077号（特許文献1）、あるいは、第18回日本ロボット学会学術講演／3P14／「2足ヒューマノイドロボットのリアルタイム歩行安定化制御－HRPにおける歩行制御モジュールの有効性の検証－」（非特許文献1）に見られるように、目標ZMPまわりの床反力モーメントの誤差、あるいは実ZMPの目標ZMPからの誤差を観測し、その誤差を小さくするように歩容を修正する技術が知られている。

【0003】

しかし、これらの技術では、並進床反力の誤差が考慮されていないため、摩擦係数の低い路面でロボットを歩行させたり、走行のように並進床反力鉛直成分が0もしくはほぼ0になる時期を有する歩容を生成する場合には、ロボットのスリップを生じないような歩容を生成することが困難である。

【0004】

また、例えば特開2002-326173号公報（特許文献2）や、PCT国際公開公報WO/03/057427/A1（特許文献3）に見られる技術が本願出願人により提案されている。これらの特許文献3、4に見られる技術では、ロボットの運動（各部位の位置、姿勢）と、床反力との関係を表す第1の動力学モデル（単純化モデル）を用いて該第1の動力学モデル上での動力学的平衡条件（床反力の並進力成分が目標値になる、ある点のまわりの床反力モーメントが目標値になるなどの条件）を満足するようにロボットの目標運動の瞬時値（瞬時目標運動）と目標床反力の瞬時値（瞬時目標床反力）とからなる瞬時目標歩容が逐次作成される。そして、この瞬時目標歩容を第2の動力学モデル（フルモデル）に入力して、該瞬時目標運動の一部（目標上体位置姿勢や目標ZMPまわりの目標モーメントなど）を補正することで、最終的な瞬時目標歩容が時系列的に生成される。

【0005】

この技術では、第1の動力学モデル（単純化モデル）として、線形性の高いモデルを使用することで、ロボットの安定な運動を継続的に行い得る歩容を効率よく短時間で作成することが可能となると共に、第2の動力学モデル（フルモデル）として比較的動力学的精度の高いモデルを使用することで、最終的に生成される歩容の運動と床反力との間の動力学的精度を実ロボットの動力学により近づけることが可能となる。

【0006】

しかし、前記特許文献2、3に見られる技術では、第2動力学モデルを用いて作成される歩容は発散しやすいため、目標ZMP軌道を修正するもしくは目標ZMPまわりに床反力モーメントを発生させるようにして、ロボットの目標運動軌道が第1の動力学モデルで作成された歩容からかけはなれないようにする必要があった。そして、この場合、目標ZMP軌道の修正量や、目標ZMPまわりの床反力モーメントが比較的大きくなることがあり、このような場合には、安定余裕を高く保つことが困難となる場合あった。逆に、安定余裕を高く保つために、目標ZMP軌道の修正量や、目標ZMPまわりの床反力モーメントの許容範囲を狭く設定すると、歩容が発散する恐れが高まるという不具合があった。

【特許文献1】特許第3443077号

【特許文献2】特開2002-326173号公報

【特許文献3】PCT国際公開公報WO/03/057427/A1

【非特許文献1】第18回日本ロボット学会学術講演／3P14／「2足ヒューマノイドロボットのリアルタイム歩行安定化制御－HRPにおける歩行制御モジュールの有効性の検証－」

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

本発明はかかる背景に鑑みてなされたものであり、ロボットのスリップを防止し得る歩容を、動力学的精度を確保しつつ効率よく生成することができる移動ロボットの歩容生成装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明の第1発明の移動ロボットの歩容生成装置は、かかる目的を達成するために、

1) 所定の作用点とその点まわりに発生する床反力モーメントの目標値および／または許容範囲を設定し、これを満足するように（具体的には所定の作用点まわりに発生する床反力モーメントの水平成分が目標床反力モーメントに略一致するか、および／または、所定の作用点まわりに発生する床反力モーメントの鉛直成分が床反力モーメント許容範囲内になるように）第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、

2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差を時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で各時刻 t において前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分 $M2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で時刻 t における前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分 $M1(t)$ との差を、または前記 $M2(t)$ と時刻 t における前記目標床反力モーメントとの差を、時刻 t における床反力モーメント成分誤差 $Merr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $Merr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力が、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、前記所定の作用点とその点まわりに発生する目標床反力モーメントと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、を備えたことを特徴とする。

【0009】

また、本発明の第2発明の移動ロボットの歩容生成装置は、

1) 目標ZMPを設定し、これを満足するように（具体的には目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントの水平成分が略0となるように）第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、

2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差を時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で前記目標ZMPまわりに発生する各時刻 t における床反力モーメント成分 $M2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力モーメント成分 $M1(t)$ との差を、または前記 $M2(t)$ の水平成分あるいは床面平行成分を、時刻 t における床反力モーメント成分誤差 $Merr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $Merr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力が、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件

とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、を備えたことを特徴とする。

【0010】

また、本発明の第3発明の移動ロボットの歩容生成装置は、

1) 目標ZMPを設定し、これを満足するように（具体的には目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントの水平成分が略0となるように）第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、

2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と、前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差を時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動から第2の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPたる $ZMP2(t)$ と前記仮生成した目標運動から第1の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPたる $ZMP1(t)$ との差を、または前記 $ZMP2(t)$ そのものを、ZMP誤差 $ZMPerr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力および第2の動力学モデル上で算出されるZMPに近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力および第1の動力学モデル上で算出されるZMPを少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $ZMPerr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力およびZMPが、ZMPに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、

を備えたことを特徴とする。

【0011】

また、本発明の第4発明の移動ロボットの歩容生成装置は、

1) 所定の作用点とその点まわりに発生する床反力モーメントの目標値および／または許容範囲と床反力並進力成分の目標値および／または許容範囲とを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、

2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差を、または、前記 $F2(t)$ と時刻 t における前記床反力並進力成分の目標値との差を、時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で各時刻 t において前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分 $M2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で時刻 t における前記所定の作用点まわりに発生する床反力モーメント成分 $M1(t)$ との差を、または、前記 $M2(t)$ と時刻 t における前記目標床反力モーメントとの差を、時刻 t における床反力モーメント成分誤差 $Merr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、

3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくように、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $Merr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力が、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、前記所定の作用点とのその点まわりに発生する目標床反力モーメントと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、を備えたことを特徴とする。

【0012】

また、本発明の第5発明の移動ロボットの歩容生成装置は、

- 1) 目標ZMPと床反力並進力成分の目標値および／または許容範囲とを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、
- 2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差、または、前記 $F2(t)$ と時刻 t における前記床反力並進力成分の目標値との差を、時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で前記目標ZMPまわりに発生する各時刻 t における床反力モーメント成分 $M2(t)$ と前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力モーメント成分 $M1(t)$ との差を、または、前記 $M2(t)$ の水平成分あるいは床面平行成分を、時刻 t における床反力モーメント成分誤差 $Merr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、
- 3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力に近づくよう、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力を少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $Merr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力が、床反力モーメントに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、
を備えたことを特徴とする。

【0013】

また、本発明の第6発明の移動ロボットの歩容生成装置は、

- 1) 目標ZMPと床反力並進力成分の目標値および／または許容範囲とを設定し、これを満足するように第1の動力学モデルを用いて、所定期間の目標運動を仮生成する仮目標歩容生成手段、
- 2) 前記仮生成した目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する各時刻 t における床反力並進力成分 $F2(t)$ と、前記仮生成した目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する時刻 t における床反力並進力成分 $F1(t)$ との差、または、前記 $F2(t)$ と時刻 t における前記床反力並進力成分の目標値との差を、時刻 t における床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ として求めると共に、前記仮生成した目標運動から第2の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPたる $ZMP2(t)$ と前記仮生成した目標運動から第1の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPたる $ZMP1(t)$ との差を、または、前記 $ZMP2(t)$ そのものを、ZMP誤差 $ZMPerr(t)$ として求め、それぞれを時系列として記憶する床反力誤差時系列記憶手段、
- 3) 前記修正された目標運動によって第2の動力学モデル上で発生する床反力および第2の動力学モデル上で算出されるZMPに近づくよう、前記修正された目標運動によって第1の動力学モデル上で発生する床反力および第1の動力学モデル上で算出されるZMPを少なくとも前記 $Ferr(t)$ の時系列と前記 $ZMPerr(t)$ の時系列とを用いて修正してなる床反力およびZMPが、ZMPに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するように、目標ZMPと目標運動とを含む目標歩容のうちの少なくとも目標運動を修正する歩容修正手段、
を備えたことを特徴とする。

【0014】

前記第1または第4発明では、前記歩容修正手段は、修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で、各時刻 t における修正された目標歩容の所定の作用点まわりに発生する床反力モーメントに、時刻 t における前記求めた床反力モーメント誤差 $Merr(t)$ または該 $Merr(t)$ に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力モーメントが、時刻 t における修正された目標歩容の目標床反力モーメントに略一致し、かつ、時刻 t における修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で発生する床反力並進力成分に、時刻 t における前記求めた床反力並進力成分誤差 $Ferr(t)$ または該 $Ferr(t)$

t ）に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力並進力成分が、時刻 t における修正された目標歩容の所定の床反力並進力成分許容範囲内になること、および／または所定の床反力並進力成分値に一致することを概ね満足するように、前記所定期間の修正された目標歩容を生成することが好ましい（第7発明）。

【0015】

同様に、前記第2または第5発明では、前記歩容修正手段は、修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で、各時刻 t における修正された目標歩容の目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントに、時刻 t における前記求めた床反力モーメント誤差Merr（ t ）または該Merr（ t ）に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力モーメントの水平成分あるいは床面平行成分が略0となり、かつ、時刻 t における修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で発生する床反力並進力成分に、時刻 t における前記求めた床反力並進力成分誤差Ferr（ t ）または該Ferr（ t ）に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力並進力成分が、時刻 t における修正された目標歩容の所定の床反力並進力成分許容範囲内になること、および／または所定の床反力並進力成分値に一致することを概ね満足するように、前記所定期間の修正された目標歩容を生成することが好ましい（第8発明）。

【0016】

同様に、前記第3または第6発明では、前記歩容修正手段は、修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で算出される各時刻 t におけるZMPに、前記求めた時刻 t におけるZMP誤差ZMPerr（ t ）または該ZMPerr（ t ）に所定の乗数を乗じたものを加えたZMPが、時刻 t における修正された目標歩容の目標ZMPに略一致し、かつ、時刻 t における修正された目標歩容の目標運動によって、第1の動力学モデル上で発生する床反力並進力成分に、時刻 t における前記求めた床反力並進力成分誤差Ferr（ t ）または該Ferr（ t ）に所定の乗数を乗じたものを加えた床反力並進力成分が、時刻 t における修正された目標歩容の所定の床反力並進力成分許容範囲内になること、および／または所定の床反力並進力成分値に一致することを概ね満足するように、前記所定期間の修正された目標歩容を生成することが好ましい（第9発明）。

【0017】

なお、前記第1または第4発明における「所定の作用点」としては、例えば目標ZMP、ロボットの全体重心点などが挙げられる。

【0018】

これらの第1～第9発明によれば、床反力並進力成分誤差Ferr（ t ）の時系列と床反力モーメント成分誤差Merr（ t ）の時系列とを用い、あるいは、床反力並進力成分誤差Ferr（ t ）の時系列とZMP誤差ZMPerr（ t ）の時系列とを用い、床反力モーメントもしくはZMPに関する所定の制約条件と床反力並進力成分に関する所定の制約条件とを満足するようにななくとも目標歩容の目標運動を修正するので、ロボットのスリップを防止しつつ、動力学的精度を高め得る歩容を生成できる。また、第2動力学モデルによる歩容探索における探索初期候補パラメータ値を、所要の境界条件を満足するパラメータ値に近い値にできるので、探索の収束効率が高く、歩容生成を効率よく行うことができる。また、所要の境界条件を満足するパラメータを探索的に求める際に、探索初期候補パラメータ値を基に生成した歩容が発散しすぎて、より適切な歩容パラメータ候補値を決定できなくなるおそれが少なくなる。また、従来の技術のように、歩容の発散を防止するための目標ZMP軌道の修正量、あるいは、目標ZMPまわりの床反力モーメントが比較的大きくなったりすることがないので、安定余裕を高く保つことができる。

【0019】

前記第1～第9発明においては、前記移動ロボットが、上体（ロボットの基体）から延設された複数の脚体を有する脚式移動ロボットであるときには、前記第1の動力学モデルは、前記各脚体先端部の運動をそれぞれ各脚体に対応する質点の運動により表し、前記上体の並進運動を該上体に対応する質点の並進運動で表し、該移動ロボットの所定の部位の姿勢変化運動をフライホイールの回転運動により表すモデルであることが好ましい（第1

0発明)。

【0020】

また、第1～第10発明においては、第1の動力学モデルは、少なくとも前記移動ロボットの上体(基体)の並進運動と該上体の姿勢変化運動とを含む運動と床反力の関係を表すモデルであることが好ましい(第11発明)。

【0021】

これらの第10および第11発明によれば、床反力の摂動と運動の摂動との間の線形性が高くなるので、歩容パラメータの解析的な決定が可能となり、歩容生成の演算処理が容易になる。また、探索的に歩容パラメータを決定する場合であっても、探索処理の収束性が高くなり、その探索時間を短くできる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0022】

以下、添付図面を参照して本発明の実施形態を説明する。尚、本明細書の実施形態では、移動ロボットとしては2足移動ロボットを例にとる。

【0023】

図1は、本発明の実施形態を適用する2足移動ロボットの全体的構成の概略を示す概略図である。

【0024】

図示の如く、2足移動ロボット(以下、ロボットという)1は上体(ロボット1の基体)3から下方に延設された左右一対の脚体(脚部リンク)2, 2を備える。両脚体2, 2は同一構造であり、それぞれ6個の関節を備える。その6個の関節は上体3側から順に、股(腰部)の回旋(回転)用(上体3に対するヨー方向の回転用)の関節10R, 10Lと、股(腰部)のロール方向(X軸まわり)の回転用の関節12R, 12Lと、股(腰部)のピッチ方向(Y軸まわり)の回転用の関節14R, 14L、膝部のピッチ方向の回転用の関節16R, 16Lと、足首のピッチ方向の回転用の関節18R, 18Lと、足首のロール方向の回転用の関節20R, 20Lとから構成される。なお、本明細書において、符号R, Lはそれぞれロボット1の右側、左側に対応するものであることを意味する符号である。

【0025】

各脚体2の足首の2つの関節18R(L), 20R(L)の下部には、各脚体2の先端部を構成する足平(足部)22R(L)が取着されると共に、両脚体2, 2の最上位には、各脚体2の股の3つの関節10R(L), 12R(L), 14R(L)を介して前記上体3が取り付けられている。上体3の内部には、詳細を後述する制御ユニット60などが格納される。なお、図1では図示の便宜上、制御ユニット60を上体3の外部に記載している。

【0026】

上記構成の各脚体2においては、股関節(あるいは腰関節)は関節10R(L), 12R(L), 14R(L)から構成され、膝関節は関節16R(L)から構成され、足首関節は関節18R(L), 20R(L)から構成される。また股関節と膝関節とは大腿リンク24R(L)で連結され、膝関節と足首関節とは下腿リンク26R(L)で連結される。

【0027】

上体3の上部の両側部には左右一対の腕体5, 5が取り付けられると共に、上体3の上端部には頭部4が配置される。各腕体5は、3つの関節30R(L), 32R(L), 34R(L)から構成された肩関節と、関節36R(L)から構成された肘関節と、関節38R(L)から構成された手首関節と、この手首関節に連結された手先部40R(L)とを備えている。肩関節と肘関節との間、および肘関節と手首関節との間はそれぞれ剛体状のリンクで構成されている。

【0028】

上記のロボット1の構成により、各脚体2の足平22R(L)は、上体3に対して6つ

の自由度を与えられている。そして、ロボット1の歩行等の移動中に、両脚体2、2を合わせて $6 * 2 = 12$ 個（この明細書で「*」はスカラに対する演算としては乗算を、ベクトルに対する演算としては外積を示す）の関節を適宜な角度で駆動することで、両足平22R, 22Lの所望の運動を行うことができる。これにより、ロボット1は任意に3次元空間を移動することができる。また、各腕体5は、その肩関節、肘関節、手首関節の回転によって、腕振り等の運動を行うことができる。

【0029】

図1に示す如く、各脚体2の足首関節18R(L), 20R(L)の下方には足平22R(L)との間に公知の6軸力センサ50が介装されている。該6軸力センサ50は、各脚体2の足平22R(L)の着地の有無、および各脚体2に作用する床反力（接地荷重）等を検出するためのものであり、該床反力の並進力の3方向成分 F_x , F_y , F_z 並びにモーメントの3方向成分 M_x , M_y , M_z の検出信号を制御ユニット60に出力する。また、上体3には、Z軸（鉛直方向（重力方向））に対する上体3の傾斜角およびその角速度およびその角速度を検出するための姿勢センサ54が備えられ、その検出信号が該姿勢センサ54から制御ユニット60に出力される。この姿勢センサ54は、図示を省略する加速度センサおよびジャイロセンサを備え、これらのセンサの検出信号が上体3の姿勢角（傾斜角）およびその角速度を検出するために用いられる。また、詳細構造の図示は省略するが、ロボット1の各関節には、それを駆動するための電動モータ64（図3参照）と、その電動モータ64の回転量（各関節の回転角）を検出するためのエンコーダ（ロータリエンコーダ）65（図3参照）とが設けられ、該エンコーダ65の検出信号が該エンコーダ65から制御ユニット60に出力される。

【0030】

さらに、図1では図示を省略するが、ロボット1の外部には、ロボット1を操縦するためのジョイスティック（操作器）73（図3参照）が設けられ、そのジョイスティック73を操作することで、直進移動しているロボット1を旋回させるなどロボット1の移動方向を指定する、ロボット1の歩行、走行などの運動形態および床面の摩擦状態（路面状態）を規定する動作のモードを指定するなど、ロボット1の歩容に対する要求もしくは制約を必要に応じて制御ユニット60に入力できるように構成されている。ジョイスティック73は有線もしくは無線により制御ユニット60との通信が可能とされている。

【0031】

図2は本実施形態における各脚体2の先端部分（各足平22R(L)を含む）の基本構成を概略的に示す図である。同図に示すように、各足平22R(L)の上方には、前記6軸力センサ50との間にばね機構70が装備されると共に、足底（各足平22R, Lの底面）にはゴムなどからなる足底弾性体71が貼られている。これらのばね機構70及び足底弾性体71によりコンプライアンス機構72が構成されている。詳細な図示は省略するが、ばね機構70は、足平22R(L)の上面部に取り付けられた方形状のガイド部材（図示省略）と、足首関節18R(L)（図2では足首関節20R(L)を省略している）および6軸力センサ50側に取り付けられ、前記ガイド部材に弾性材（ゴムやばね）を介して微動自在に収納されるピストン状部材（図示省略）とから構成されている。

【0032】

図2に実線で表示された足平22R(L)は、床反力を受けていないときの状態を示している。各脚体2が床反力を受けると、コンプライアンス機構72のばね機構70と足底弾性体71とがたわみ、足平22R(L)は図中に点線で例示したような位置姿勢に移る。このコンプライアンス機構72の構造は、着地衝撃を緩和するためだけでなく、制御性を高めるためにも重要なものである。その詳細は、例えば本出願人が先に提案した特開平5-305584号公報に詳細に説明されているので、本明細書でのさらなる説明は省略する。

【0033】

図3は制御ユニット60の構成を示すブロック図である。該制御ユニット60はマイクロコンピュータにより構成されており、CPUからなる第1の演算装置90及び第2の演

算装置92、A/D変換器80、カウンタ86、D/A変換器96、RAM84、ROM94、並びにこれらの間のデータ授受を行うバスライン82を備えている。この制御ユニット60では、各脚体2の6軸力センサ50、姿勢センサ54（加速度センサおよびレトジャイロセンサ）、ジョイスティック73等の出力信号はA/D変換器80でデジタル値に変換された後、バスライン82を介してRAM84に送られる。またロボット1の各関節のエンコーダ65（ロータリーエンコーダ）の出力は、カウンタ86を介してRAM84に入力される。

【0034】

前記第1の演算装置90は後述の如く目標歩容を生成すると共に、関節角変位指令（各関節の変位角もしくは各電動モータ64の回転角の指令値）を算出し、RAM84に送出する。また、第2の演算装置92はRAM84から関節角変位指令と、前記エンコーダ65の出力信号に基づいて検出された関節角の実測値とを読み出し、各関節の駆動に必要な操作量を算出して、その操作量をD/A変換器96とサーボアンプ64aとを介して各関節を駆動する電動モータ64に出力する。

【0035】

図4は、本明細書の実施形態におけるロボット1の制御ユニット60の主な機能的構成を示すブロック図である。この図4中の「実ロボット」の部分以外の部分が制御ユニット60が実行する処理機能（主として第1の演算装置90及び第2の演算装置92の機能）によって構成されるものである。その処理機能は、制御ユニット60に実装されたプログラム等によって実現されている。尚、以下の説明では、ロボット1の各部（脚体2、腕体5など）の左右を特に区別する必要がないときは、前記符号R、Lを省略する。

【0036】

以下説明すると、制御ユニット60は、後述の如く目標歩容を自在かつリアルタイムに生成して出力する歩容生成装置100を備えている。この歩容生成装置100は、その機能によって本発明の実施形態を実現するものである。この歩容生成装置100が出力する目標歩容は、補正目標上体姿勢軌道（上体3の目標姿勢の軌道）、補正目標上体位置軌道（上体3の目標位置の軌道）、目標足平位置姿勢軌道（各足平22の目標位置及び目標姿勢の軌道）、目標腕姿勢軌道（各腕体の目標姿勢の軌道）、目標ZMP（目標全床反力中心点）軌道、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメント軌道および目標全床反力軌道から構成される。尚、脚体2や腕体5以外に、上体3に対して可動な部位（頭部など）を備える場合には、その可動部位の目標位置姿勢軌道が目標歩容に加えられる。

【0037】

ここで、本明細書での歩容に関する基本的な用語の定義などについて説明しておく。歩容における「軌道」は時間的変化のパターン（時系列パターン）を意味し、「軌道」の代わりに「パターン」と称することもある。また、「姿勢」は空間的な向きを意味する。例えば上体姿勢はZ軸（鉛直軸）に対するロール方向（X軸まわり）の上体3の傾斜角（姿勢角）とピッチ方向（Y軸まわり）の上体3の傾斜角（姿勢角）とで表され、足平姿勢は各足平22に固定的に設定された2軸の空間的な方位角で表される。本明細書では、上体姿勢は上体姿勢角ということもある。なお、腕体5に関する目標腕姿勢は、本明細書の実施形態では上体3に対する相対姿勢で表される。

【0038】

上体位置は、上体3のあらかじめ定めた代表点（上体3に対して任意に固定設定したローカル座標系でのある固定点）の位置を意味する。同様に、足平位置は、各足平22のあらかじめ定めた代表点（各足平22に対して任意に固定設定したローカル座標系での固定点）の位置を意味する。例えば各足平22の代表点は、各足平22の底面上（より具体的には各脚体2の足首関節の中心から各足平22の底面への垂線が該底面と交わる点等）に設定される。

【0039】

上体3に関する前記補正目標上体姿勢および補正目標上体位置は、ある基本となる目標上体姿勢（仮目標上体姿勢）および目標上体位置（仮目標上体位置）を補正したものであ

る。本明細書の実施形態では、基本となる目標上体位置姿勢は、後述する単純化モデル歩容生成部で決定される目標上体位置姿勢（後述の図10のS032で決定される目標上体位置姿勢）が相当する。

【0040】

なお、以降の説明では、誤解を生じるおそれがない場合には、しばしば「目標」を省略する。

【0041】

歩容のうちの、床反力に係わる構成要素以外の構成要素、すなわち足平位置姿勢、上体位置姿勢等、ロボット1の各部位の位置姿勢に関する構成要素を総称的に「運動」という。また、各足平22に作用する床反力（並進力及びモーメントからなる床反力）を「各足平床反力」と呼び、ロボット1の全て（2つ）の足平22R, 22Lについての「各足平床反力」の合力を「全床反力」という。ただし、以下の説明においては、各足平床反力はほとんど言及しないので、特に断らない限り、「床反力」は「全床反力」と同義として扱う。

【0042】

目標床反力は、一般的には、作用点とその点に作用する並進力及びモーメントによって表現される。作用点はどこにとっても良いので、同一の目標床反力でも無数の表現が考えられるが、特に目標床反力中心点（全床反力の中心点の目標位置）を作用点にして目標床反力を表現すると、目標床反力のモーメント成分は、鉛直成分（鉛直軸（Z軸）まわりのモーメント成分）を除いて零になる。換言すれば、目標床反力中心点まわりの目標床反力のモーメントの水平成分（水平軸（X軸及びY軸）まわりのモーメント）は零になる。

【0043】

なお、動力学的平衡条件を満足する歩容では、ロボット1の目標運動軌道から算出されるZMP（目標運動軌道から算出される慣性力と重力との合力がその点まわりに作用するモーメントが、鉛直成分を除いて零になる点）と目標床反力中心点とは一致することから、目標床反力中心点軌道の代わりに目標ZMP軌道を与えると言っても同じことである。

【0044】

ここで、ロボット1の歩行を行う場合には、例えば本出願人が先に特開平10-86080号公報で提案した上体高さ決定手法によってロボット1の上体3の鉛直位置（上体高さ）が決定されると、並進床反力鉛直成分は従属的に決定される。さらに、目標歩容の運動による慣性力と重力との合力が目標ZMPまわりに発生するモーメントの水平成分が0になるようにロボット1の上体水平位置軌道（あるいは全体重心の位置軌道）を決定することで、並進床反力水平成分も従属的に決定される。このため、ロボット1の歩行を行う場合には、目標歩容の床反力に関して明示的に設定すべき物理量としては、目標ZMPだけでもよい。

【0045】

一方、床反力が0もしくはほぼ0になるような時期を伴う歩容でのロボット1の移動、例えばロボット1の走行を行う場合には、並進床反力鉛直成分もロボット1の動作制御上重要である。このため、並進床反力鉛直成分の目標軌道を明示的に設定した上で、ロボット1の目標上体鉛直位置等の軌道を決定することが望ましい。また、ロボット1の歩行においても、摩擦係数が低い床面上（低ミュー路上）でロボット1を移動させる場合には、並進床反力鉛直成分（より厳密には並進床反力の床面に垂直な成分）が摩擦力に影響を及ぼすことから、ロボット1のスリップなどを防止する上で、並進床反力鉛直成分の目標軌道を明示的に設定することが望ましい。さらに、本発明の実施形態では、最終的に歩容生成装置100が出力する目標歩容では、目標ZMPまわりに補正目標床反力モーメント（水平成分が0とは限らないモーメント）を発生させる。

【0046】

このようなことから、本明細書の実施形態では、歩容生成装置100が出力する目標歩容の床反力に関する構成要素として、目標ZMP軌道のほか、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントと、目標並進床反力鉛直成分とを含ませている。

【0047】

そして、本明細書では、歩容生成装置100が output する目標歩容は、広義には、「1歩ないしは複数歩の期間の目標運動軌道と目標床反力軌道との組」の意味で使用され、狭義には、「1歩の期間の目標運動軌道と、目標ZMP、補正目標床反力モーメント及び目標並進床反力鉛直成分を含む目標床反力軌道との組」の意味で使用される。

【0048】

但し、本明細書の実施形態においては、最終的な目標歩容（歩容生成装置100が output する目標歩容）を決定するまでの過程で作成する目標歩容（仮目標歩容）では、目標ZMPまわりの目標床反力モーメントの水平成分（より正確には、後述の単純化モデル上でロボット1の運動によって発生する床反力モーメントの誤差を加味した、目標ZMPまわりの目標床反力モーメントの水平成分）は、本来の目標ZMPの定義どおりに0とされる。従って、最終的に決定する目標歩容以外の仮目標歩容では、上記狭義の目標歩容から、補正目標床反力モーメントを除いたものが目標歩容の意味で使用される。補足すると、本明細書の実施形態では、最終的な目標歩容（歩容生成装置100が output する目標歩容）を決定するまでの過程で作成する目標歩容（仮目標歩容）が本発明に密接に関連するものとなっている。このため、以降の説明で現れる目標歩容の大部分は、前記狭義の目標歩容から、補正目標床反力モーメントを除いたもの（目標ZMPを満足する歩容）の意味で使用される。

【0049】

なお、以降の説明では、「床反力鉛直成分」は「並進床反力鉛直成分」を意味するものとし、床反力のうちのモーメントの鉛直成分（鉛直軸回り成分）は、「モーメント」という用語を用いて「床反力鉛直成分」と区別をする。同様に、「床反力水平成分」は「並進床反力水平成分」を意味するものとする。並進床反力は、床反力並進力成分ということもある。

【0050】

また、目標歩容の「1歩」は、ロボット1の片方の脚体2が着地してからもう一方の脚体2が着地するまでの意味で使用する。

【0051】

また、歩容における両脚支持期とは、ロボット1がその自重を両脚体2, 2で支持する期間、片脚支持期とはいずれか一方のみの脚体2でロボット1の自重を支持する期間、空中期とは両脚体2, 2が床から離れている（空中に浮いている）期間を言う。片脚支持期においてロボット1の自重を支持しない側の脚体2を遊脚と呼ぶ。なお、片脚支持期と空中期とが交互に繰り返されるロボット1の走行歩容では両脚支持期は無い。この場合、空中期では両脚2, 2とも、ロボット1の自重を支持しないこととなるが、便宜上、該空中期の直前の片脚支持期において遊脚であった脚体2、支持脚であった脚体2をそれぞれ該空中期においても遊脚、支持脚と呼ぶ。

【0052】

また、目標歩容の軌道は、グローバル座標系（床に固定された座標系）で記述される。グローバル座標系としては、例えば支持脚足平22の着地位置姿勢に対応して定まる支持脚座標系が用いられる。この支持脚座標系は、例えば支持脚足平22の底面のほぼ全面を床に接地した状態で、その足平22が連結された足首関節の中心から床面に延ばした垂線が床と交わる点を原点とし、その原点を通る水平面に支持脚足平22を投影したときの該足平22の前後方向をX軸方向、左右方向をY軸方向とする座標系（Z軸方向は鉛直方向）である。

【0053】

図5は、歩容生成装置100の詳細を示すブロック図である。この図5を参照して、歩容生成装置100の処理のより具体的な概要を以下に説明する。

【0054】

図示の如く、歩容生成装置100は歩容パラメータ決定部100aを備える。歩容パラメータ決定部100aは、目標歩容を規定する歩容パラメータの値あるいは時系列テーブ

ルを決定する。

【0055】

本明細書の実施形態では、歩容パラメータ決定部100aが決定する歩容パラメータには、目標歩容のうちの、目標足平位置姿勢軌道、目標腕姿勢軌道、目標ZMP軌道、および目標床反力鉛直成分軌道をそれぞれ規定するパラメータが含まれる。

【0056】

ここで、歩容生成装置100が目標歩容を生成するとき、遊脚足平22の着地予定位置姿勢、着地予定時刻、あるいは歩幅、移動速度等の歩容生成用の基本的な要求値（要求パラメータ）が、前記ジョイスティック73、もしくは図示しない行動計画部（ロボット1の行動計画を作成する装置）などの装置から歩容生成装置100に与えられる。あるいは、上記要求パラメータをあらかじめ記憶保持した記憶媒体から該要求パラメータを歩容生成装置100が読み込む。そして、歩容生成装置100の歩容パラメータ決定部100aは、その要求パラメータに応じて歩容パラメータを決定する。

【0057】

また、本明細書の実施形態では、歩容パラメータ決定部100aが決定する歩容パラメータには、基準上体姿勢軌道、ZMP許容範囲、床反力水平成分許容範囲をそれぞれ規定するパラメータも含まれる。

【0058】

ここで、前記基準上体姿勢軌道は、最終的に歩容生成装置100が出力するものではないが、目標歩容を決定するときに参酌されるものである。この基準上体姿勢軌道は、ロボット1の上体姿勢に関して、前記ジョイスティック73あるいは行動計画部から与えられ、もしくはあらかじめ定められた要求（上体姿勢を鉛直姿勢に保つなどの要求）にそのまま従って生成される上体姿勢軌道である。目標上体姿勢（以降、「基準」が付いていない「上体姿勢」は、目標上体姿勢を表す）は、基準上体姿勢に長期的に追従するか、または一致するように生成される。

【0059】

また、前記ZMP許容範囲に関して補足すると、本明細書の実施形態では、目標歩容は、目標ZMPのまわりに補正目標床反力モーメント（これは一般には0ではない）を発生するように修正される。したがって、目標ZMPは、本来の定義（床反力モーメント水平成分が0である点という定義）とは異なる点となり、本来の定義を満足するZMP（以下、真のZMPという）は、補正目標床反力モーメントを目標床反力鉛直成分で割った値だけ目標ZMPからずれた位置に移る。

【0060】

修正された歩容（歩容生成装置100が最終的に出力する目標歩容）の真のZMPは、少なくともZMP存在可能範囲（いわゆる支持多角形のこと。床と足平22の底面との間に粘着力が作用しないと仮定した場合における床反力作用点（ZMP）の存在可能範囲）内になければならない。さらにロボット1の安定余裕を十分にとるために、修正された歩容の真のZMPは、ZMP存在可能範囲のなかの中心付近の範囲にあることが望ましい。そこで、本明細書の実施形態では修正された歩容の真のZMPが存在できる許容範囲を設定する。この範囲をZMP許容範囲と呼ぶ。ZMP許容範囲は、ZMP存在可能範囲と一致あるいはZMP存在可能範囲内に包含されるように設定される。

【0061】

なお、前記したように、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントを目標床反力鉛直成分で除算したものが、目標ZMPに対する真のZMPの位置のずれ量を表すので、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントを設定する代わりに、目標ZMPに対する真のZMPの位置のずれ量（補正目標床反力モーメントのZMP換算値）を設定してもよい。また、ZMP許容範囲は、その境界の位置に目標床反力鉛直成分を乗算することで、補正目標床反力モーメント許容範囲に変換することができ、その補正目標床反力モーメント許容範囲をZMP許容範囲の代わりに設定するようにしてもよい。

【0062】

また、前記床反力水平成分許容範囲は、ロボット1の足平22の床との接地面に、足平22が滑らないような大きさの摩擦力を発生させ得る床反力水平成分の許容範囲である。本明細書の実施形態では、少なくとも最終的に歩容生成装置100が outputする目標歩容の運動（目標運動）は、それによって発生するロボット1の慣性力の水平成分に釣り合う床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲内に収まるように（床反力水平成分許容範囲を満足するように）生成される。

【0063】

なお、本明細書の実施形態で設定する床反力水平成分許容範囲は、後述のS022の処理で設定される定常歩容用のものと、S026の処理で設定される基本歩容用のものと、S030で設定される歩容補正用（フルモデル補正用）のものとがある。ただし、これらの床反力水平成分許容範囲は必ずしも互いに異なる必要はなく、同一でもよい。一方、ZMP許容範囲は、S030処理で設定される歩容補正用（フルモデル補正用）のものだけである。

【0064】

歩容パラメータ決定部100aで決定された歩容パラメータは目標瞬時値発生部100bに入力される。目標瞬時値発生部100bは入力された歩容パラメータに基づき、基準上体姿勢、目標足平位置姿勢、目標ZMP、目標床反力鉛直成分、ZMP許容範囲、床反力水平成分許容範囲等、目標歩容の一部の構成要素（目標上体位置姿勢を除く）の瞬時値（前記制御ユニット60の所定の制御処理周期毎の値）を逐次算出（発生）する。また、目標瞬時値発生部100bは、並進床反力（床反力並進力成分）誤差軌道（詳しくは並進床反力水平成分の誤差の瞬時値の時系列）および床反力モーメント誤差軌道（詳しくは目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分の誤差の瞬時値の時系列）も出力する。これらの誤差軌道は、歩容の運動によって後述のセミフルモデル（動力学モデル）で発生する床反力に対する、後述の単純化モデル（動力学モデル）で発生する床反力の誤差の時系列パターンに相当するものである。

【0065】

目標瞬時値発生部100bで算出された目標瞬時値は、単純化モデル歩容生成部100cに入力される。単純化モデル歩容生成部100cは、入力された目標瞬時値を基に、ロボット1の運動と床反力との関係を近似表現する動力学モデルとしての後述の単純化モデルを用いて目標上体位置姿勢（仮目標上体位置姿勢）の瞬時値を算出する。なお、ここで使用する単純化モデルは、目標瞬時値発生部100bで使用するものと同一である。単純化モデル歩容生成部100cは、目標ZMPまわりの床反力モーメントと並進床反力とにに関する所要の動力学的条件が満たされるように目標上体位置姿勢の瞬時値を算出する。その動力学的条件は、目標ZMPまわりに床反力モーメント誤差の分の修正をした床反力モーメントが単純化モデル上で発生し、また、歩容の運動によって単純化モデル上で発生する並進床反力水平成分を並進床反力誤差の分で修正してなる並進床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲を満足するという条件である。補足すると、本明細書の実施形態では、目標床反力鉛直成分軌道を明示的に設定するので、目標上体位置姿勢の瞬時値は、目標運動によって発生する慣性力と重力との合力の並進力鉛直成分（換言すれば、ロボット1の全体重心の鉛直方向の並進運動に伴う慣性力と重力との合力）が目標床反力鉛直成分に釣り合うという動力学的条件も満足するように決定される。

【0066】

単純化モデル歩容生成部100cの演算処理により、目標上体位置姿勢を含む目標歩容（仮目標歩容）の瞬時値が逐次決定されていくこととなる。以降、単純化モデル歩容生成部100cで求められた目標上体位置姿勢を構成要素とする目標歩容を単純化モデル歩容という。

【0067】

単純化モデル歩容生成部100cで求められた目標上体位置姿勢を含む単純化モデル歩容は、フルモデル補正部100dに入力される。このフルモデル補正部100dは、単純化モデル歩容の目標上体位置姿勢を、動力学的精度の高い動力学モデルとしてのフルモ

ルを用いて補正してなる補正目標上体位置姿勢を算出すると共に、目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分の目標値である補正目標床反力モーメントを算出する。

【0068】

フルモデル補正部100dは、より一般的には、次のD1～D3の条件を満足するように、E1あるいはE2の処理を実行する。すなわち、フルモデル補正部100dは、

D1) 単純化モデルを用いて生成した歩容（単純化モデル歩容）を変位次元補正用モデルを用いて修正してなる歩容（以降、変位次元補正歩容と呼ぶ）よりも高い精度で動力学的平衡条件を満足する。

D2) 真のZMP（目標ZMPのまわりに補正目標床反力モーメントを発生させることによって修正された本来の定義を満足するZMP）は、ZMP許容範囲（安定余裕が十分維持できる許容範囲）に存在する。

D3) 床反力水平成分は床反力水平成分許容範囲内になる。

という条件を満足するように、

E1) 前記変位次元補正歩容の上体位置姿勢を補正する。

あるいは

E2) 前記変位次元補正歩容の上体位置姿勢を補正すると共に、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメントを出力する（目標床反力を補正する）。

【0069】

本明細書の実施形態では、D1～D3の条件を満足するように、E2の処理が実行される。なお、本明細書の実施形態におけるフルモデル補正部100dの処理は、例えば本願出願人が先に提案したPCT国際公開公報WO/03/057427/A1にて詳細に説明されているもの（具体的には、同公報の図13のS038の処理）と同じである。従って、本明細書でのフルモデル補正部100dの処理の詳細な説明は省略する。

【0070】

また、本明細書の実施形態では、フルモデル補正部100dによる補正を行うが、その補正を省略し、単純化モデル歩容の瞬時値をそのまま歩容生成装置100から出力するようにしてよい。

【0071】

補足すると、本明細書の実施形態では、歩容パラメータ決定部100a、目標瞬時値発生部100bおよび単純化モデル歩容生成部100cが、本発明の中核に係わる処理を実行するものとなっている。

【0072】

図4に戻って、上述のように決定される補正目標上体位置姿勢、目標ZMPまわりの補正目標床反力モーメント、目標足平位置姿勢の瞬時値を含む目標歩容の瞬時値は、複合コンプライアンス制御装置101（図4で破線で囲んだ部分）に入力される。この複合コンプライアンス制御装置101では、ロボット1のバランスを保ちつつ、目標歩容に追従するように関節アクチュエータ（電動モータ64）が制御される。なお、複合コンプライアンス制御装置101のより具体的な処理は後述する。

【0073】

次に、本発明の実施形態をさらに具体的に説明していく。本実施形態では、目標瞬時値発生部100bは、前記制御ユニット60の制御処理周期毎に、複数の動力学モデルを用いて、目標ZMP軌道を段階的に修正しつつ目標歩容の瞬時値を決定する。

【0074】

ここで、第1実施形態で歩容生成に用いられる上体運動モードと動力学モデルについて説明する。

【0075】

走行など、空中期がある歩容や、低摩擦床面での歩行においては、単に上体水平加速度を調整するだけでは、目標歩容の床反力水平成分が許容範囲内（あるいは摩擦限界内）に存在しつつ動力学的平衡条件を満足することができない場合がある。そこで、本実施形態では、以下に説明する上体3の2つの運動モード（上体並進モード及び上体回転モード）

を複合的に発生させることにより、目標歩容の床反力水平成分が許容範囲内（あるいは摩擦限界内）に存在しつつ動力学的平衡条件を満足するようにしている。

【0076】

図6 (a) のように、ある運動状態から、上体水平加速度だけを摂動させると、全体重心水平加速度と全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、上体水平加速度の摂動は、（それによって発生する慣性力と重力の合力に対して動力学的に釣り合う）床反力鉛直成分を摂動させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメント（ただし鉛直軸まわり成分を除く）と床反力水平成分（厳密には、並進床反力水平成分）とを摂動させる。この運動モードを上体並進モードと呼ぶ。

【0077】

言いかえると、床反力鉛直成分を変化させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分と床反力水平成分（並進床反力水平成分）を変化させる運動を上体並進モードと呼ぶ。

【0078】

この時の単位加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を ΔM_p 、単位加速度当たりの床反力水平成分の変化を ΔF_p とする。図6 (a) に示す状況で上体3を前方に水平加速すると、 ΔM_p と ΔF_p は図6 (a) に示す矢印の向きに作用する。

【0079】

感覚的に判り易くするために、運動によって発生する慣性力と重力の合力に釣り合う床反力を用いて表現したが、慣性力と重力の合力を用いて表現した方が、理論的には的確である。なお、上記合力と床反力は、互いに大きさが同じで向きが逆になっている。

【0080】

一方、図6 (b) のように、ある運動状態から、ある点P_rまわりに上体姿勢角加速度を摂動させると、全体重心は摂動せずに、全体重心まわりの角運動量が摂動する。すなわち、点P_rまわりの上体姿勢角加速度摂動は、床反力鉛直成分と床反力水平成分（厳密には、並進床反力鉛直成分と並進床反力水平成分）を摂動させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分を摂動させる。この運動モードを上体回転モードと呼ぶ。

【0081】

言いかえると、床反力鉛直成分と床反力水平成分を変化させずに、目標ZMPまわりの床反力モーメントの水平成分を変化させる運動を上体回転モードと呼ぶ。

【0082】

この時の単位角加速度当たりの床反力モーメント成分の変化を ΔM_r 、単位角加速度当たりの床反力の水平成分の変化を ΔF_r とする。 ΔF_r は零である。図6 (b) に示す状況で上体が前傾するように角加速度を与えると、 ΔM_r は図6 (b) に示す矢印の向きに作用する。

【0083】

上体3の運動には、上体並進モードと上体回転モード以外に、上体鉛直移動モードがある。これは、上体3を鉛直方向に移動させる運動である。

【0084】

本実施形態においては、前記単純化モデル歩容生成部100cで単純化モデルが用いられると共に、歩容パラメータ決定部100aおよび目標瞬時値発生部100bの処理で、2つの動力学モデルとしての単純化モデルと、セミフルモデルとが用いられる。以下にこれららの動力学モデルを説明する。

【0085】

図7に、単純化モデルの例を示す。図示の如く、この単純化モデルはロボット1の各脚体2にそれぞれ対応する2つの質点（足平質点）2m, 2m、及び上体3に対応する質点（上体質点）2.4mからなる合計3質点と、イナーシャがあつて質量のないフライホイールFHとから構成されるモデルである。この単純化モデルは、本願出願人が例えれば先に提案したPCT国際公開公報WO/03/057427/A1に例示した動力学モデルである。従つて、本明細書での詳細な説明は省略するが、単純化モデルの動力学は、次のように

に変数を定義したとき、式1a～1cにより表される。なお、ここでは、本明細書の理解を容易にするために、サジタルプレーン（前後軸（X軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式のみを記述し、ラテラルプレーン（左右軸（Y軸）と鉛直軸（Z軸）を含む平面）での運動方程式を省略する。

Z_{sup}：支持脚質点鉛直位置、Z_{swg}：遊脚質点鉛直位置、Z_b：上体質点鉛直位置、Z_{Gtotal}：全体重心鉛直位置、X_{sup}：支持脚質点水平位置、X_{swg}：遊脚質点水平位置、X_b：上体質点水平位置、X_{Gtotal}：全体重心水平位置、θ_{by}：鉛直方向に対するY軸回りの上体姿勢角（傾斜角）、mb：上体質点質量、m_{sup}：支持脚質点質量、m_{swg}：遊脚質点質量、m_{total}：ロボット総質量（=mb+m_{sup}+m_{swg}）、J：上体慣性モーメント（上体回転モードにおける等価慣性モーメント）、Fx：床反力水平成分（詳しくは並進床反力の前後方向（X軸）成分）、Fz：床反力鉛直成分（詳しくは並進床反力の鉛直方向（Z軸）成分）、My：目標ZMPまわりの床反力モーメント（詳しくは床反力モーメントの左右軸（Y軸）まわり成分）、g：重力加速度。なお、任意の変数Xに対してd2X/dt²は、Xの2階微分値を意味するものとする。

【0086】

$$F_z = mb * (g + d2Zb/dt^2) + m_{sup} * (g + d2Z_{sup}/dt^2) + m_{swg} * (g + d2Z_{swg}/dt^2) \quad \dots \text{式 1 a}$$

$$F_x = mb * d2Xb/dt^2 + m_{sup} * d2X_{sup}/dt^2 + m_{swg} * d2X_{swg}/dt^2 \quad \dots \text{式 1 b}$$

$$\begin{aligned} My = -mb * (X_b - X_{zmp}) + (g + d2Zb/dt^2) + mb * (Z_b - Z_{zmp}) * d2Xb/dt^2 \\ - m_{sup} * (X_{sup} - X_{zmp}) * (g + d2Z_{sup}/dt^2) \\ + m_{sup} * (Z_{sup} - Z_{zmp}) * d2X_{sup}/dt^2 \\ - m_{swg} * (X_{swg} - X_{zmp}) * (g + d2Z_{swg}/dt^2) \\ + m_{swg} * (Z_{swg} - Z_{zmp}) * (d2X_{swg}/dt^2) + J * d2\theta_{by}/dt^2 \end{aligned} \quad \dots \text{式 1 c}$$

なお、ロボット全体重心位置には次の関係式が成立する。

$$Z_{Gtotal} = (mb * Z_b + m_{sup} * Z_{sup} + m_{swg} * Z_{swg}) / m_{total} \quad \dots \text{式 1 d}$$

$$X_{Gtotal} = (mb * X_b + m_{sup} * X_{sup} + m_{swg} * X_{swg}) / m_{total} \quad \dots \text{式 1 e}$$

この単純化モデルでは、脚体2、2の動力学（各質点2m、2mの動力学）と上体3の動力学（質点2.4m及びフライホイールFHの動力学）とが相互に非干渉に構成されると共に、ロボット1全体の動力学は、それらの線形結合で表される。また、さらに、上体3の運動と床反力との関係は、上体3の並進運動（上体並進モード）と床反力との関係、並びに上体3の回転運動（上体回転モード）と床反力との関係に分離される。具体的には、上体質点2.4mの水平運動によって発生する床反力は、上体3の水平方向並進運動（上体並進モード）によって発生する床反力に対応し、フライホイールの回転運動によって発生する床反力は、上体3の回転運動（上体回転モード）、すなわち上体3の姿勢変化運動によって発生する床反力に対応する。

【0087】

尚、ロボット1の腕体の質量は上体質点2.4mに含まれるものとし、上体質点2.4mは腕体の質量を含む質量をもつ。本実施形態では、目標歩容における腕体の運動（腕振り運動）は、後述するように、ロボット1の腕振り以外の運動によってロボット1に発生する鉛直軸まわりの慣性力のモーメントを打ち消しつつも、上体3に対する両腕体の全体の重心の相対位置が動かないように行なわれる所以、腕体の腕振り運動による（鉛直軸まわり成分を除く）床反力モーメントへの影響と床反力水平成分への影響とは無視する。

【0088】

図8にセミフルモデルを例示する。同図に示す如く、セミフルモデルは、上体3、各足平2.2、各脚体2の膝関節の近傍部分（大腿リンクの膝関節寄りの部分）にそれぞれ対応する質点を有すると共に、上体3に上体質点の回りにイナーシャ（慣性モーメント）I_b

をもつモデルである。このセミフルモデルでは、動力学的方程式は省略するが、ロボット1の運動と床反力との関係は、前記単純化モデルと同様に、各質点の並進運動および上体3の姿勢変化運動と、床反力（並進床反力および目標ZMP回りの床反力モーメント）との関係として記述される。このセミフルモデルは、前記単純化モデルよりも動力学的精度が高い（より詳しくは、ロボット1の任意の目標運動に対して、セミフルモデル上で発生する床反力が、単純化モデル上で発生する床反力よりも、当該目標運動を想定されている床面上で実際のロボット1が行ったときに該ロボット1に実際に作用する実床反力により一致する）ものとなっている。

【0089】

なお、前記フルモデル補正部100dで用いるフルモデルは、例えば図9に示す如く、ロボット1の各リンクに質点をもつような多質点モデルである。この場合、ロボット1の各リンクは、それに対応する質点の回りにイナーシャをもつようなものであってもよい。

【0090】

補足すると、前記セミフルモデルは、フルモデルと同じ構造のものであってもよい。

【0091】

次に、本実施形態に関して、歩容生成装置100の処理の詳細をより具体的に説明する。

【0092】

本実施形態における歩容生成装置100は、ロボット1の片方の脚体2が着地してから他方の脚体2が着地するまでの1歩分の目標歩容（前記狭義の目標歩容）を単位として、その1歩分の目標歩容を順番に生成する。ここで、新たに生成しようとしている目標歩容を「今回歩容」、その次の目標歩容を「次回歩容」、さらにその次の目標歩容を「次次回歩容」、というように呼ぶ。また、「今回歩容」の一つ前に生成した目標歩容を「前回歩容」と呼ぶ。

【0093】

また、歩容生成装置100が今回歩容を新たに生成するとき、該歩容生成装置100には、ロボット1の2歩先までの遊脚側足平22の着地予定位置姿勢、着地予定時刻の要求値（要求）が歩容に対する要求パラメータとして入力される（あるいは歩容生成装置100が記憶装置から要求パラメータを読み込む）。そして、歩容生成装置100は、これらの要求パラメータを基に、補正目標上体位置姿勢軌道、目標足平位置姿勢軌道、目標ZMP軌道、目標床反力鉛直成分軌道、目標腕姿勢軌道、補正目標床反力モーメント軌道等を生成する。

【0094】

以下に歩容生成装置100の歩容生成処理の詳細を図10～図21を参照しつつ説明する。図10は、その歩容生成装置100が実行する歩容生成処理のメインルーチンを示すフローチャート（構造化フローチャート）である。なお、このメインルーチン処理の手順自体は、その一部のサブルーチン処理を除いて、例えば本願出願人による前記PCT国際公開公報WO/03/057427/A1（以下、公報文献1という）と同じである。

【0095】

まずS010において時刻tを0に初期化するなど種々の初期化作業が行なわれる。この処理は、歩容生成装置100の起動時等に行なわれる。次いで、S012を経てS014に進み、歩容生成装置100は、制御周期（図10のフローチャートの演算処理周期）毎のタイマ割り込みを待つ。制御周期は Δt である。

【0096】

次いで、S016に進み、歩容の切り替わり目であるか否かが判断され、歩容の切り替わり目であるときはS018に進むと共に、切り替わり目でないときはS030に進む。ここで、上記「歩容の切り替わり目」は、前回歩容の生成が完了し、今回歩容の生成を開始するタイミングを意味し、例えば前回歩容の生成を完了した制御周期の次の制御周期が歩容の切り替わり目になる。

【0097】

S018に進むときは時刻 t が0に初期化され、次いでS020に進み、次回歩容支持脚座標系、次回歩容支持脚座標系、今回歩容周期および次回歩容周期が読み込まれる。これらの支持脚座標系及び歩容周期は、前記要求パラメータにより定まるものである。すなわち、本実施形態では、歩容生成装置100にジョイステイック44等から与えらる要求パラメータは、2歩先までの遊脚側足平22の着地予定位置姿勢（足平22が着地してから足底を床面にほぼ全面的に接触させるように、滑らさずに回転させた状態での足平位置姿勢）、着地予定時刻の要求値を含んでおり、その1歩目の要求値、2歩目の要求値がそれぞれ、今回歩容、次回歩容に対応するものとして、今回歩容の生成開始時（前記S016の歩容の切り替わり目）以前に歩容生成装置100に与えられたものである。なお、これらの要求値は今回歩容の生成途中でも変更することは可能である。

【0098】

そして、上記要求パラメータにおける1歩目の遊脚側足平22（今回歩容での遊脚側足平22）の着地予定位置姿勢の要求値に対応して次回歩容支持脚座標系が定まる。また、2歩目の遊脚側足平22の着地予定位置姿勢の要求値に応じて次々回歩容支持脚座標系が定まる。また、今回歩容周期は、今回歩容の支持脚側足平22の着地予定時刻（要求値）から、1歩目（今回歩容）の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まり、次回歩容周期は、1歩目の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）から2歩目の遊脚側足平22の着地予定時刻（要求値）までの時間として定まる。

【0099】

このS020の処理は、前記公報文献1の図13のS020の処理と同一であり、本明細書での説明は以上に留める。

【0100】

次いでS022に進み、歩容生成装置100は、今回歩容に続く仮想的な周期的歩容としての定常旋回歩容の歩容パラメータを決定する。該歩容パラメータは、定常旋回歩容における目標足平位置姿勢軌道を規定する足平軌道パラメータ、基準とする上体姿勢軌道を規定する基準上体姿勢軌道パラメータ、目標腕姿勢軌道を規定する腕軌道パラメータ、目標ZMP軌道を規定するZMP軌道パラメータ、目標床反力鉛直成分軌道を規定する床反力鉛直成分軌道パラメータを含む。さらに、目標床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータも歩容パラメータに含まれる。

【0101】

尚、この明細書で「定常旋回歩容」は、その歩容を繰り返したときに歩容の境界（本実施形態では1歩毎の歩容の境界）においてロボット1の運動状態（足平位置姿勢、上体位置姿勢等の状態）に不連続が生じないような周期的歩容を意味するものとして使用する。以降、「定常旋回歩容」を「定常歩容」と略す場合もある。

【0102】

定常旋回歩容の詳細は、前記公報文献1や特願2000-352011号などにて説明されているので、本明細書での詳細な説明は省略するが、その概要は次の通りである。

【0103】

周期的歩容である定常旋回歩容は、本実施形態では、ロボット1の2歩分の歩容、すなわち今回歩容に続く第1旋回歩容と該第1旋回歩容に続く第2旋回歩容とからなる歩容を該定常旋回歩容の1周期分の歩容として、その1周期分の歩容を繰り返す歩容である。ここで「旋回」なる用語を用いたのは、旋回率を零とするときは直進を意味するので、直進も広義の意味で旋回に含ませることができるからである。また、生成する今回歩容が例えばロボット1の走行を行う走行歩容（片脚支持期と空中期とを有する歩容）であるときには、定常旋回歩容の第1旋回歩容及び第2旋回歩容も走行歩容であり、ロボット1の歩行を行う歩行歩容（片脚支持期と両脚支持期とを有する歩容）であるときには、定常旋回歩容の第1旋回歩容及び第2旋回歩容も歩行歩容である。つまり、第1旋回歩容及び第2旋回歩容の基本的な歩容形態は今回歩容と同一である。

【0104】

なお、以降の説明では、特にことわらない限り、生成する歩容として走行歩容を例にと

って説明する。

【0105】

定常旋回歩容は、歩容生成装置100で今回歩容の終端における発散成分や上体鉛直位置速度、上体姿勢角及びその角速度等のロボット1の運動状態を決定するために暫定的に作成されるものであり、歩容生成装置100からそのまま出力されるものではない。

【0106】

尚、「発散」とは、ロボット1の上体3の位置が両足平22, 22の位置からかけ離れた位置にずれてしまうことを意味する。発散成分の値とは、ロボット1の上体3の位置が両足平22, 22の位置（より具体的には、支持脚側足平22の接地面に設定されたグローバル座標系（支持脚座標系）の原点）からかけ離れていく具合を表す数値である。例えば、本明細書の実施形態では、発散成分は、前記した各動力学モデルに対して、次式により求められる。

【0107】

$$\text{発散成分} = \text{上体質点水平位置} + \text{上体質点水平速度} / \omega_0 \quad \dots \text{式2}$$

この式2の ω_0 は所定の値である。

【0108】

本明細書の実施形態では、目標歩容が前記発散を生じることなく、継続的に生成されるように、発散成分を指標にして歩容（今回歩容）を生成するようにした。すなわち、これから生成しようとする今回歩容の後に続く定常歩容が前記今回歩容に係わる要求パラメータに応じて設定され、定常歩容の初期発散成分を求めてから、今回歩容の終端発散成分を定常歩容の初期発散成分に一致させる（より一般的には、今回歩容を定常歩容に連続させ、もしくは近づける）ように、今回歩容を生成する。

【0109】

本題に戻り、S022では、図11に示すサブルーチン処理のフローチャートに従って、定常歩容の歩容パラメータが決定される。決定する歩容パラメータとしては、定常歩容の足平位置姿勢軌道、基準上体姿勢軌道、腕姿勢軌道、床反力鉛直成分軌道、床反力水平成分許容範囲、ZMP軌道を規定するパラメータがある。この処理は、前記公報文献1の図15のフローチャートの処理と同一であるので、ここでの説明は省略する。

【0110】

補足すると、図11のS112で設定（再定義）する定常歩容の初期時刻Tsは、第1旋回歩容の空中期（目標床反力鉛直成分が0となる時期）の開始直前の時刻であり、一步の期間Tcycは、定常歩容の第1旋回歩容と第2旋回歩容との合計時間の期間である。定常歩容は、その周期性によって、任意の時刻Txにおける状態（ロボット1の各部位の位置姿勢やその変化速度の状態）は時刻Tx+Tcycにおける状態と同一になる歩容である。

【0111】

次いで、S024に進み、定常歩容の初期状態が算出される。ここで算出される初期状態は、定常歩容の初期上体水平位置速度（水平方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期上体鉛直位置速度（鉛直方向での初期上体位置及び初期上体速度）、初期発散成分、初期上体姿勢角およびその角速度である。この初期状態の算出は、図12のサブルーチン処理のフローチャートに従って、前記単純化モデルおよびセミフルモデルを使用して行なわれる。

【0112】

図12の処理を概略的に説明すれば、時刻Ts（定常歩容の初期時刻）でのロボット1の初期上体水平位置姿勢、初期上体水平速度、初期上体姿勢角速度、上体傾斜復元メントZMP換算値ピーク値の候補を探索対象として、これらの探索対象を含む定常歩容の初期状態を仮決めし、この初期状態から、動力学モデル（単純化モデルおよびセミフルモデル）を用いて定常歩容の終端（時刻Ts+Tcyc）までの歩容を生成する。そして、その生成した定常歩容が境界条件（初期と終端での状態（本実施形態では上体水平位置、上体

水平速度、上体姿勢角、上体姿勢角速度) がほぼ一致すること) を満たしているか否かを判断し、満たしていない場合には、探索対象の値を変更する。これを繰り返すことで、最終的に定常歩容の境界条件を満たすことができる初期状態が決定される。なお、本実施形態では、定常歩容の初期状態の探索処理では、上記探索対象の初期値は、基本的には任意でよいが、例えば前回歩容の作成時に決定した定常歩容の初期状態などを基に決定してもよい。また、定常歩容の初期(時刻 T_s) の上体姿勢角は、S022で決定した基準上体姿勢に関する歩容パラメータから決定され、時刻 T_s での基準上体姿勢が定常歩容の初期(時刻 T_s) 上体姿勢として決定される。また、定常歩容の初期(時刻 T_s) の足平位置姿勢は、S022で決定した足平位置姿勢に関する歩容パラメータから、時刻 T_s での足平位置姿勢を有限時間整定フィルタを用いて算出することで決定される。有限時間整定フィルタは、例えば前記公報文献1等にて説明されているので、ここでの説明は省略する。また、定常歩容の初期(時刻 T_s) の腕姿勢は、S022で決定した腕姿勢に関する歩容パラメータから、時刻 T_s での腕姿勢を算出することで決定される。また、定常歩容の初期(時刻 T_s) の上体鉛直位置および上体鉛直速度は、ロボット1の全体重心の鉛直方向の慣性力と重力との合力が目標床反力鉛直成分に釣り合い、且つ、全体重心の鉛直位置が定常歩容の境界条件を満たすように決定される。

【0113】

補足すると、図12の処理の基本的な考え方(手法)は、前記公報文献1の図20の処理と同様である。但し、本明細書の実施形態では、上記探索対象として、上体姿勢角速度と上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値とが含まれ、この点は、前記公報文献1の図20の処理と相違している。また、S208の処理の細部の処理(サブルーチン処理)の一部も前記公報文献1のものと相違している。

【0114】

なお、図12のフローチャートの処理中で求める上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値ZMPrecpeakは、ロボット1の片脚支持期(より詳しくは、片脚支持期の開始直後から終了直前までの時期。以下、上体傾斜角復元期間ということがある)で上体姿勢を基準上体姿勢に近づけるために必要な床反力モーメントのZMP換算値(基準となる目標ZMPからのずれ量)のピーク値を示すものであり、その例を図示したものが図19である。

【0115】

図12の処理のうちのS208の処理は、図13のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行され、さらに、この図13のS306およびS322の処理は、図14のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。さらに、図14のS412の処理は、図15のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。以下、これらの処理を説明する。

【0116】

図13の処理は、図示の通り、図12の処理で仮決めした初期(時刻 T_s) 状態から、時刻 $T_s + T_{cyc}$ まで(終端状態まで)の定常歩容の瞬時値を時系列的に実際に作成する処理である。この場合、S300で上体3の初期状態(時刻 T_s での状態)が仮決めした値にセットされた後、S302において、床反力モーメント誤差Merr_p(k)および並進床反力誤差Ferr_p(k)の時系列の値が0に初期化される。Merr_p(k)は、定常歩容の初期時刻 T_s から終端時刻 $T_s + T_{cyc}$ までの、目標ZMPまわりの床反力モーメントの誤差(詳しくは、単純化モデルを用いて生成された歩容の運動によって、セミフルモデル上で目標ZMPなどの所定の点まわりに発生する床反力モーメントと単純化モデル上で発生する床反力モーメントとの差、あるいは、単純化モデルを用いて目標ZMPを満足するように生成された歩容の運動によって、セミフルモデル上で目標ZMPまわりに発生する床反力モーメント水平成分と目標ZMPまわりに発生すべき目標床反力モーメント水平成分(=0)との差)の時系列(所定の時間幅 Δk 每の時系列)を表すものであり、前記床反力モーメント誤差軌道を構成するものである。また、Ferr_p(k)は、定常歩容の初期時刻 T_s から終端時刻 $T_s + T_{cyc}$ までの、並進床反力の誤差(詳しくは、単純化モデルを用いて生成された

歩容の運動によって、セミフルモデルで発生する床反力並進力成分と単純化モデル上で発生する床反力並進力成分との差) の時系列 (所定の時間幅 Δk 毎の時系列) を表すものであり、前記並進床反力誤差軌道を構成するものである。図13の処理では、定常歩容を作成するだけでなく、これらの誤差Merr_p(k) およびFerr_p(k) を決定する (確定する) 処理も含まれる。

【0117】

図13の処理では、定常歩容は、その初期から終端までの各時刻 k において、その歩容の運動によって、単純化モデル上で発生する目標ZMPまわりの床反力モーメントに床反力モーメント誤差Merr_p(k)を加えたものが、目標ZMPまわりの真の床反力モーメントであるとみなし、その真の床反力モーメントが0となるように (目標ZMPの本来の定義を満足するように) 作成される。また、さらに、定常歩容は、その初期から終端までの各時刻 k において、その歩容の運動によって、単純化モデル上で発生する並進床反力水平成分に並進床反力誤差Ferr_p(k)を加えたものが、真の並進床反力水平成分であるとみなし、その真の床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲を満足するように作成される。この際、Merr_p(k) およびFerr_p(k)は、その信頼性を高めることが望ましいと共に歩容の運動パターンによって変化するので、1周期分の定常歩容の作成が所要の条件を満たすまで繰り返され、その都度、定常歩容の1周期分 (2歩分) のMerr_p(k) およびFerr_p(k)の時系列を観測することで、適切なMerr_p(k) およびFerr_p(k)の時系列が決定される。この場合、誤差Merr_p(k) およびFerr_p(k)の基準とする床反力の真値として、前記セミフルモデルが発生する床反力が用いられる。

【0118】

S304～S310の処理によって、S302で初期化した誤差Merr_p(k) およびFerr_p(k)の時系列を用いて、図示の通り定常歩容の瞬時値 (定常歩容の初期から終端までの瞬時値の時系列) が作成されると共に、その作成された定常歩容の運動によって単純化モデルが発生する目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分の誤差Merr(k)の時系列と並進床反力水平成分の誤差Ferr(k)の時系列とが算出される (S306)。そして、新たに算出された誤差Merr(k), Ferr(k)のそれぞれと、その誤差の現在値Merr_p(k), Ferr_p(k) (S302で設定された初期値) との差 Δ Merr(k), Δ Ferr(k)の時系列が算出される (S308)。また、Merr_p(k), Ferr_p(k)の値は、それぞれ新たに算出された誤差Merr(k), Ferr(k)の値に更新される (S310)。

【0119】

そして、S316において、 Δ Merr(k)の時系列および Δ Ferr(k)の時系列が所定の許容範囲内にあるか否か (例えば Δ Merr(k)の時系列の絶対値の最大値もしくは実効値もしくは絶対値の総和が0近傍の許容範囲内にあり、且つ、 Δ Ferr(k)の時系列の絶対値の最大値もしくは実効値もしくは絶対値の総和が0近傍の許容範囲内にあるか否か) が判断され、この判断結果がNOである限り、S300～S310と同様の処理が、S318～S326で繰り返される。但し、この場合、S322で定常歩容の瞬時値の時系列を作成するにあたっては、Merr_p(k), Ferr_p(k)の現在値 (最新値) 、すなわち、S310またはS326で更新された値が用いられる。

【0120】

そして、S316の判断結果がYESになると、図13の処理は終了し、この時点で最終的に作成された定常歩容が図12のS208で作成すべき定常歩容として得られる。

【0121】

図13のS306の処理 (定常歩容の瞬時値の時系列の作成処理) は、図14のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。

【0122】

この図14の処理では、S400～S410の処理によって、S022で求めた定常歩容のパラメータを基に、目標床反力鉛直成分、目標ZMP、目標両足平位置姿勢、基準上体姿勢、目標腕姿勢、目標上体鉛直位置、床反力水平成分許容範囲の瞬時値が求められる。

【0123】

補足すると、図14のS400～S410の処理は、前記公報文献1の図22のS400～S410処理と同様である。

【0124】

さらに、S412の処理によって、図中に記載された条件を満たすように上体水平加速度および上体姿勢角加速度の瞬時値が決定される。この場合、Merr_p(k)が、作成中の歩容の運動によって時刻kにおいて単純化モデルが発生する目標ZMPまわりの床反力モーメント水平成分の誤差分であるとみなした場合、単純化モデル上で、目標ZMPまわりに-Merr_p(k)が発生するように、歩容の運動を決定すれば、その決定した運動によって実際のロボット1に作用する目標ZMPまわりの真の床反力モーメントはほぼ0になると考えられる。従って、S412では、単純化モデル上で、目標ZMPまわりに-Merr_p(k)が発生するように上体水平加速度および上体姿勢角加速度を決定する。また、Ferr_p(k)が時刻kにおける歩容の運動によって単純化モデルが発生する並進床反力水平成分の誤差分であるとみなした場合、単純化モデル上で歩容の運動によって発生する並進床反力水平成分にFerr_p(k)を加えたものが床反力水平成分許容範囲(S410で決定されたもの)を超えないよう歩容の運動を決定すれば、その決定した運動によって実際のロボット1に作用する並進床反力水平成分は、当該床反力水平成分許容範囲内に収まると考えられる。従って、S412では、単純化モデル上で並進床反力水平成分にFerr_p(k)を加えたものが床反力水平成分許容範囲を超えないよう上体水平加速度および上体姿勢角加速度を決定する。

【0125】

そして、S414の処理によって、上体水平加速度および上体姿勢角加速度をそれぞれ2階積分して、上体水平位置および上体姿勢角の瞬時値が決定される。この時点までに、上体鉛直位置、足平位置姿勢および腕姿勢の瞬時値は既に決定されているので、これらと、上体水平位置および上体姿勢角の瞬時値とから構成されるロボット1の瞬時運動(定常歩容の目標運動の瞬時値)が決定されたこととなる。

【0126】

また、S414に続くS415の処理によって、上記の如く決定された目標運動によって単純化モデル上で発生する時刻k(現在時刻)における目標ZMPまわりの床反力モーメントMsmp1(k)と、床反力並進力成分Fsmp1(k)とが算出される。

【0127】

その算出の仕方は、決定された足平位置姿勢、上体位置・速度、上体姿勢角・角速度からなる目標運動を基に、単純化モデルを用いて目標ZMPまわりの床反力モーメントMsmp1(k)と床反力並進力成分Fsmp1(k)とを算出すればよい。

【0128】

あるいは、次式によって求めてもよい。

【0129】

$$Msmp1(k) = 0 - Merr_p(k) \quad \dots \dots \text{式3 a}$$

$$Fsmp1(k) = Fx'(k) - Ferr_p(k) \quad \dots \dots \text{式3 b}$$

なお、式3a中の「0」は、目標ZMPまわりの目標床反力モーメント水平成分(=0)を意味している。このように目標床反力モーメントが0の場合は、当然ながら、式3a中の「0」は省略してもよい。

【0130】

また、S415に続くS416の処理によって、上記の如く決定された目標運動を基に、前記セミフルモデル上で発生する目標ZMPまわりの床反力モーメントの瞬時値Msemifull(k)と並進床反力の瞬時値Fsemifull(k)とが算出される。これらのMsemifull(k)、Fsemifull(k)は、それぞれ目標運動に従って実際のロボット1の運動を行ったときにロボット1に作用する床反力モーメント、並進床反力の真値に相当するものである。

【0131】

そして、S418の処理によって、次式3c, 3dによって、新たな床反力モーメント誤差Merr(k)および並進床反力誤差Ferr(k)が算出される。

【0132】

$$\begin{aligned} Merr(k) &= M_{semifull}(k) - M_{smp1}(k) & \cdots \text{式 3c} \\ Ferr(k) &= F_{semifull}(k) - F_{smp1}(k) & \cdots \text{式 3d} \end{aligned}$$

図14のS412のサブルーチン処理が、図15のフローチャートで示す如く実行される。

【0133】

この図15の処理では、定常歩容の瞬時値を作成しようとしている現在時刻k（作成中の定常歩容内での時刻）が前記上体傾斜角復元期間内の時刻でないとき（現在時刻kが、片脚支持期の終了直前から次の片脚支持期の開始直後までの期間（目標床反力鉛直成分が0であるかもしくは0に近い期間）にあるとき）には、S504～S518の処理によって、目標ZMPまわりの本来の目標床反力モーメント水平成分（=0）を、床反力モーメント誤差の現在値Merr_p(k)で修正してなる床反力モーメント水平成分-Merr_p(k)が単純化モデル上で発生し、且つ、単純化モデル上で全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分Fxtmpを、並進床反力誤差の現在値Ferr_p(k)で修正してなる並進床反力水平成分Fxtmp'が床反力水平成分許容範囲を満足する（該許容範囲内に収まる）ようになし、上体並進モードの上体水平加速度 α と、上体回転モードの上体角加速度 β （上体姿勢角の角加速度）とが決定される。そして、上体水平加速度がその決定した上体水平加速度 α である場合に、単純化モデル上で全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分Fxを、並進床反力誤差の現在値Ferr_p(k)で修正してなる並進床反力水平成分Fx'が現在作成中の歩容の運動によって発生する並進床反力水平成分として決定される。

【0134】

また、現在時刻k（作成中の定常歩容内での時刻）が前記上体傾斜角復元期間内の時刻であるときには、S520～S530の処理によって、上体角加速度 β は、単純化モデル上で、上体傾斜復元モーメントZMP換算値パターンの瞬時値（これは、前記仮決定された上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク値と現在時刻kとに応じて定まる。図19を参照）に対応する床反力モーメントを発生するように決定される。また、上体水平加速度は、単純化モデル上で、上体並進モードによって発生する目標ZMPまわりの床反力モーメントが、本来の目標床反力モーメント水平成分（=0）を床反力モーメント誤差の現在値Merr_p(k)で修正してなる床反力モーメント水平成分-Merr_p(k)になるための上体水平加速度と、上体角加速度 β による床反力モーメントと同等の床反力モーメントを発生する上体水平加速度との差として求められる。これにより、上体姿勢を基準上体姿勢に向かって復元させつつ、目標ZMPまわりに、-Merr_p(k)が発生するように上体角加速度 β および上体水平加速度 α が決定される。また、上体水平加速度が上記の如く求めた加速度 α である場合に、単純化モデル上で全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分Fxを、並進床反力誤差の現在値Ferr_p(k)で修正してなる並進床反力水平成分Fx'が現在作成中の歩容の運動によって発生する並進床反力水平成分として決定される。

【0135】

補足すると、図15の処理の基本的な考え方（手法）は、前記公報文献1の図22の処理と同様である。但し、同公報文献1のものでは、単純化モデル上で目標ZMPを満足し、且つ、床反力水平成分許容範囲を満足するように上体加速度および上体姿勢角加速度が決定される。これに対して、本実施形態の図15の処理では、目標ZMPまわりの本来の目標床反力モーメント水平成分（=0）を、床反力モーメント誤差の現在値Merr_p(k)で修正してなる床反力モーメント水平成分-Merr_p(k)が単純化モデル上で発生し、且つ、単純化モデル上で全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分Fxtmpを、並進床反力誤差の現在値Ferr_p(k)で修正してなる並進床反力水平成分Fxtmp'が床反力

水平成分許容範囲を満足する（該許容範囲内に収まる）ように上体加速度および上体姿勢角加速度が決定される。

【0136】

なお、図15のS500で設定する時刻Tmは、上体傾斜復元期間の開始時刻、Ts2は上体傾斜復元期間の終了時刻、Teは定常歩容の終端時刻（=Ts+Tcyc）である（図19を参照）。

【0137】

補足すると、本実施形態では、単純化モデル上で全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分Fxtmpを、並進床反力誤差の現在値Ferr_p(k)で修正してなる並進床反力水平成分Fxtmp'が床反力水平成分許容範囲を満足する（該許容範囲内に収まる）ようにしたが、Fxtmpが、床反力水平成分許容範囲の上限値および下限値を並進床反力誤差の現在値Ferr_p(k)で修正してなる許容範囲を満足するように上体加速度および上体姿勢角加速度を決定するようにしてもよい。

【0138】

また、本実施形態では、目標ZMPまわりの床反力モーメントが、本来の目標床反力モーメント水平成分（=0）を床反力モーメント誤差の現在値Merr_p(k)で修正してなる床反力モーメント水平成分-Merr_p(k)になるように上体加速度および上体姿勢角加速度を決定したが、床反力モーメント誤差の現在値Merr_p(k)にある所定の乗数（例えば1以下の正数）を乗じたもので修正してなる床反力モーメント水平成分を単純化モデル上の目標ZMPまわりの床反力モーメントの目標値として上体加速度および上体姿勢角加速度を決定してもよい。

【0139】

同様の考え方によって、単純化モデル上で全体重心の水平加速度による慣性力に釣り合う床反力水平成分Fxtmpを、並進床反力誤差の現在値Ferr_p(k)に所定の乗数（例えば1以下の正数）を乗じたもので修正してなる並進床反力水平成分が床反力水平成分許容範囲を満足するように上体加速度および上体姿勢角加速度を決定してもよい。

【0140】

本実施形態では、以上説明した如く、定常歩容を生成するので、S024で最終的に生成された定常歩容は、その運動によって、セミフルモデル上で発生する床反力が、目標ZMPと床反力水平成分許容範囲を満足するように決定されることとなる。この際、定常歩容は、歩容の運動に対して単純化モデル上で発生する床反力の誤差分を加味した上で、線形性の高い単純化モデルの動力学を基に生成するので、歩容の運動が発散したりすることなく短時間で効率よく定常歩容の初期状態を探索的に決定することができる。

【0141】

図10の説明に戻って、以上説明したようにS024の処理を実行した後、S026において、今回歩容の歩容パラメータが決定（一部は仮決定）される。この処理は、図16のフローチャートに従って実行される。ここで決定する歩容パラメータとしては、足平位置姿勢軌道、基準上体姿勢軌道、腕姿勢軌道、床反力鉛直成分軌道、床反力水平成分許容範囲、ZMP軌道を規定するパラメータがある。この処理は、前記公報文献1の図33のフローチャートの処理と同一であるので、ここでの詳細な説明は省略するが、上記各軌道が定常歩容につながるように各軌道を規定する歩容パラメータが決定される。

【0142】

補足すると、ここで決定されるZMP軌道パラメータは仮値であり、その仮値により規定されるZMP軌道の例（X軸方向の軌道の例）が図21の最上段に示されている。また、図16のS612で設定する上体傾斜角復元期間は、図21の時刻Taから時刻Tbまでの期間であり、片脚支持期の開始直後から終了直前までの期間である。

【0143】

次いで、S028に進んで、今回歩容の歩容パラメータ（ZMP軌道パラメータ）が修正される。この処理では、今回歩容の終端における発散成分がS024で決定した定常旋回歩容の初期発散成分に一致するように（より詳しくは上体位置姿勢軌道を定常歩容に連

続させ、もしくは近づけるように）、今回歩容の歩容パラメータのうちのZMP軌道パラメータが修正される。

【0144】

この処理は、図17のフローチャートで示すサブルーチン処理に従って行われる。

【0145】

図17の処理を概説すると、単純化モデル上で、今回歩容の終端発散成分が定常歩容の初期発散成分に一致もしくはほぼ一致するように（今回歩容を定常歩容につながらせるように）、ZMP修正量aと、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbとが探索的に決定される。ここで、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbは、上体傾斜角復元期間で上体姿勢を基準上体姿勢に近づけるために必要な床反力モーメントのZMP換算値のパターンの2つのピーク値を示すものであり、その例を図示したものが図20である。定常歩容の場合の上体傾斜復元モーメントZMP換算値のピーク値は1つであったが、今回歩容の終端における上体姿勢角およびその角速度をそれぞれ定常歩容の初期上体姿勢角およびその角速度に一致させるために、本実施形態では、上体傾斜復元モーメントZMP換算値の調整可能な2つのパラメータとして、第1ピーク値ZMPrecpeekaおよび第2ピーク値ZMPrecpeekbが用いられる。

【0146】

また、ZMP修正量aは、今回歩容を定常歩容につなげるための目標ZMPの補正量であり、その例を図示したものが、図21の中段の図である。

【0147】

図17の処理をより詳しく説明すると、まず、探索対象であるa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbの単純化モデル上の値の初期値が仮決定され、これらの値と単純化モデルとを用いて今回歩容（仮今回歩容）が算出される。そして、その算出した仮今回歩容の終端（今回歩容の遊脚足平の着地時刻）での発散成分と定常歩容の初期発散成分（前記S024で最終的に算出したもの）との差、仮今回歩容の終端での上体姿勢角と定常歩容の初期上体姿勢角（前記S024で最終的に算出したもの）との差、並びに、仮今回歩容の終端での上体姿勢角の角速度と定常歩容の初期上体姿勢角速度（前記S024で最終的に算出したもの）との差が求められる。そして、これらの差の値がいずれも許容範囲内にあるか否か（0に近いか否か）の条件を満たしているか判断し、満たしていない場合には、探索対象の値を変更する。これを繰り返すことで、最終的に単純化モデル上で仮今回歩容を定常歩容につながらせることが可能な歩容パラメータ修正値としてのa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbが決定される。なお、本実施形態では、a、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbの探索処理では、それらの探索対象の初期値は、基本的には任意でよいが、例えば前回歩容の作成時に最終的に決定したa、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekbの値などを基に決定してもよい。

【0148】

図17の処理のうちのS704の処理は、図18のフローチャートで示すサブルーチン処理により実行される。

【0149】

この図18の処理は、定常歩容の作成に係わる前記図13の処理と同様に、目標ZMPまわりの床反力モーメント誤差および並進床反力誤差を観測しつつ、今回歩容（仮今回歩容）の瞬時値をその初期から終端まで時系列的に逐次作成する処理である。この場合、図13の定常歩容の生成処理との違いは、歩容の初期状態と、歩容生成の期間だけである。より詳しくは、この相違点に關し、図18の処理では、S800、S818において、前回歩容の終端状態（詳しくは今回歩容の支持脚座標系で見た終端状態）が今回歩容（仮今回歩容）の初期状態として設定される。また、S806～S810のループ処理、並びに、S822～S826のループ処理を実行する期間は、今回歩容の初期時刻（k=0）から、今回歩容の終端時刻Tcurr（今回歩容の遊脚足平の着地予定時刻）までの期間である（S804、S820を参照）。これ以外の処理は、図13の処理と同一である。従って

、図18のS806、S822の処理は、前記図14のサブルーチン処理によって実行される。

【0150】

本実施形態では、以上説明した如く、仮今回歩容を生成するので、S028で最終的に生成される仮今回歩容は、セミフルモデル上で目標ZMPと床反力水平成分許容範囲を満足しつつ、定常歩容につながるような（今回歩容の境界条件を満たすような）ものとなる。この際、仮今回歩容は、単純化モデル上での床反力の誤差分を加味した上で、該単純化モデルの動力学を基に生成するので、歩容の運動が発散したりすることなく短時間で効率よく今回歩容の歩容パラメータ（a、ZMPrecpeekaおよびZMPrecpeekb）を探索的に決定することができる。

【0151】

図10の説明に戻って、以上説明したようにS028の処理を実行した後、S030に進んで、フルモデル補正用のZMP許容範囲と床反力水平成分許容範囲を規定するパラメータが決定される。

【0152】

この処理は、前記公報文献1の図13のS030の処理と同一であり、ここでの説明は省略する。

【0153】

以上説明したS018～S030までの処理が、前記歩容パラメータ決定部100aで実行される処理である。

【0154】

S030の処理を実行した後、あるいは、S016の判断結果がNOであるときには、S032に進んで、今回歩容の瞬時値を逐次決定する。この処理のサブルーチン処理は、前記図14のフローチャートの処理と同じである。但し、この場合には、S412で用いるMerr_p(k)およびFerr_p(k)の時系列の値として、前記図10のS028で最終的に決定された値が用いられる。また、S416およびS418の処理は省略される。また、時間の刻み幅は、制御ユニット60の制御周期 Δt とされる。

【0155】

次いで、S034に進んで、ロボット1のスピン（鉛直軸まわりの回転）をキャンセルするための腕体の動作が決定される。この処理は、ロボット1の腕を振らずに目標歩容通りにロボット1を運動させた場合に目標ZMPまわりに発生する床反力モーメントの鉛直成分と逆向きの床反力モーメントを腕体の腕振り（両腕を前後逆方向に振る運動）によって発生させるように腕体の姿勢を決定するものであり、前記公報文献1の図13のS034と同様に行われる。その詳細は、同公報文献1に記載されているので、ここではさらなる説明を省略する。

【0156】

補足すると、S032の中のS412およびS414の処理とS034の処理とが、前記単純化モデル歩容生成部100cで実行される処理である。

【0157】

次いで、S036に進んで、フルモデル補正用（前記フルモデル補正部100eの処理用）のZMP許容範囲の瞬時値と、床反力水平成分許容範囲の瞬時値とが決定される。この処理では、前記S030で決定したZMP許容範囲および床反力水平成分許容範囲を規定する歩容パラメータに基づいて決定される。

【0158】

補足すると、S032～S036（S032の中のS412およびS414の処理とS034の処理とを除く）の処理が、前記目標瞬時値発生部100bで実行される処理である。

【0159】

次いで、S038に進んで、フルモデルを用いた補正歩容を発生する。この処理は、前記フルモデル補正部100cにより実行される処理である。この場合、この処理は、前記

公報文献1の図13のS038の処理と同一であり、同公報文献1に記載されたとおりに実行される。従って、本明細書では詳細な説明は省略する。この処理により、目標上体位置姿勢（前記変位次元補正歩容の上体位置姿勢）をさらに修正してなる補正目標上体位置姿勢と補正目標床反力モーメントとが決定される。

【0160】

以上が、本実施形態における歩容生成装置100の歩容生成処理である。

【0161】

次に図4を参照して複合コンプライアンス制御装置101の動作を説明しておく。なお、複合コンプライアンス制御装置101の動作は、本出願人が先に出願した特開平10-277969号公報などに詳細に記載されているので、本明細書では概略的な説明にとどめる。歩容生成装置100において、上記したように生成された目標歩容のうち、補正目標上体位置姿勢（軌道）、目標腕姿勢（軌道）が、ロボット幾何学モデル（逆キネマティクス演算部）102に送出される。

【0162】

また、目標足平位置姿勢（軌道）、目標ZMP軌道（目標全床反力中心点軌道）、および目標全床反力（軌道）（補正目標床反力モーメントと目標床反力鉛直成分）は、複合コンプライアンス動作決定部104に送られると共に、目標床反力分配器106にも送られる。そして、目標床反力分配器106で、床反力は各足平22に分配され、目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力が決定される。この決定された目標各足平床反力中心点および目標各足平床反力は複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。

【0163】

複合コンプライアンス動作決定部104から、機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）がロボット幾何学モデル102に送られる。ロボット幾何学モデル102は、目標上体位置姿勢（軌道）と機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を入力されると、それらを満足する脚体2, 2の12個の関節の関節変位指令（値）を算出して変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の12個の関節の変位を追従制御する。また、ロボット幾何学モデル102は、目標腕姿勢を満足する腕関節の変位指定（値）を算出して変位コントローラ108に送る。変位コントローラ108は、ロボット幾何学モデル102で算出された関節変位指令（値）を目標値としてロボット1の腕体の12個の関節の変位を追従制御する。

【0164】

ロボット1に生じた床反力（詳しくは実各足床反力）は6軸力センサ50によって検出される。その検出値は前記複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。また、ロボット1に生じた姿勢傾斜偏差 θ_{errx} , θ_{erry} （詳しくは目標上体姿勢角に対する実姿勢角の偏差で、ロール方向（X軸回り）の姿勢角偏差が θ_{errx} であり、ピッチ方向（Y軸回り）の姿勢角偏差が θ_{erry} である）が姿勢センサ54を介して検出され、その検出値は姿勢安定化制御演算部112に送られる。この姿勢安定化制御演算部112で、ロボット1の上体姿勢角を目標上体姿勢角に復元するための目標全床反力中心点（目標ZMP）まわり補償全床反力モーメントが算出されて複合コンプライアンス動作決定部104に送られる。複合コンプライアンス動作決定部104は、入力値に基づいて目標床反力を修正する。具体的には、目標全床反力中心点（目標ZMP）回りに補償全床反力モーメント、あるいは、補償全床反力モーメントと補正目標床反力モーメントとの和が作用するように目標床反力を修正する。

【0165】

複合コンプライアンス動作決定部104は、修正された目標床反力に、センサ検出値などから算出される実ロボットの状態および床反力を一致させようと上記機構変形補償付き修正目標足平位置姿勢（軌道）を決定する。ただしすべての状態を目標に一致させることは事実上不可能であるので、これらの間にトレードオフ関係を与えて妥協的になるべく一致させる。すなわち、各目標に対する制御偏差に重みを与えて、制御偏差（あるいは制御

偏差の2乗)の重み付き平均が最小になるように制御する。これにより、実際の足平位置姿勢と全床反力とが目標足平位置姿勢と目標全床反力とに概ね従うように制御される。

【0166】

なお、以上説明した実施形態では、床反力モーメント誤差を用いるようにしたが、これを目標床反力鉛直成分で除算したものが、ZMP(ロボット1の歩容の運動によって発生する慣性力と重力との合力のモーメント水平成分が0となる床面上の点)の目標ZMPからのずれ量(誤差)に相当するものとなる。従って、床反力モーメント誤差の代わりにZMPの目標ZMPからの誤差を用いるようにしてもよい。この場合、図14のS412の処理では、ロボット1の歩容の運動によって発生する慣性力と重力との合力が、当該誤差(Merr_p(k)を目標ZMPに対するZMPのずれ量に換算した値)の分だけ目標ZMPから逆向きにずらした点の回りに作用する床反力モーメントの水平成分が0になるように上体水平加速度と上体姿勢角加速度を決定することが、目標ZMPまわりに-Merr_p(k)が発生するように上体水平加速度と上体姿勢角加速度を決定することと同等になる。但し、空中期を有する歩容を生成する場合、その空中期では、ZMPが不定となるため、前記実施形態の如く、床反力モーメント誤差を用いることが好ましい。

【0167】

また、先にも述べたように前記セミフルモデルは、フルモデル補正用のフルモデルと同一でもよい。この場合、歩容パラメータを探索的に決定するための処理(図10のS024、S028の処理)を短時間で効率よく行ううえでは、セミフルモデル用の床反力水平成分許容範囲は、フルモデル用の床反力水平成分許容範囲よりも広めに設定することが好ましい。

【0168】

また、目標ZMPまわりの床反力モーメント鉛直成分の許容範囲を設定して、単純化モデルが発生する床反力モーメントにMerr_p(k)を加えたモーメントが、該許容範囲を満足するように運動を生成しても良い。

【0169】

また、床反力並進力鉛直成分の目標値を設定して、単純化モデルが発生する床反力並進力鉛直成分にFerr_p(k)を加えた床反力並進力鉛直成分が、該目標値を満足するように運動を生成しても良い。

【図面の簡単な説明】

【0170】

【図1】本発明の実施形態を適用する移動ロボット(2足歩行ロボット)の全体構成を概略を示す図。

【図2】図1のロボットの各脚体の足平部分の構成を示す側面図。

【図3】図1のロボットに備えた制御ユニットの構成を示すブロック図。

【図4】図3の制御ユニットの機能的構成を示すブロック図。

【図5】図4に示す歩容生成装置の機能を示すブロック図。

【図6】(a), (b)はそれぞれロボットの運動モード(上体並進モード、上体回転モード)を説明するための図。

【図7】歩容生成で用いる第1動力学モデル(単純化モデル)の構造を示す図。

【図8】歩容生成で用いる第2動力学モデル(セミフルモデル)の構造を示す図。

【図9】歩容生成で用いるフルモデルの構造を示す図。

【図10】第1実施形態における歩容生成装置のメインルーチン処理を示すフローチャート。

【図11】図10のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図12】図10のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図13】図12のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図14】図13のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図15】図14のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図16】図10のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図17】図10のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図18】図17のサブルーチン処理を示すフローチャート。

【図19】定常歩容における上体傾斜復元モーメントZMP換算値の例を示すグラフ

◦ 【図20】今回歩容における上体傾斜復元モーメントZMP換算値の例を示すグラフ

◦ 【図21】今回歩容における仮目標ZMPとZMP修正量と目標ZMPとの例を示すグラフ。

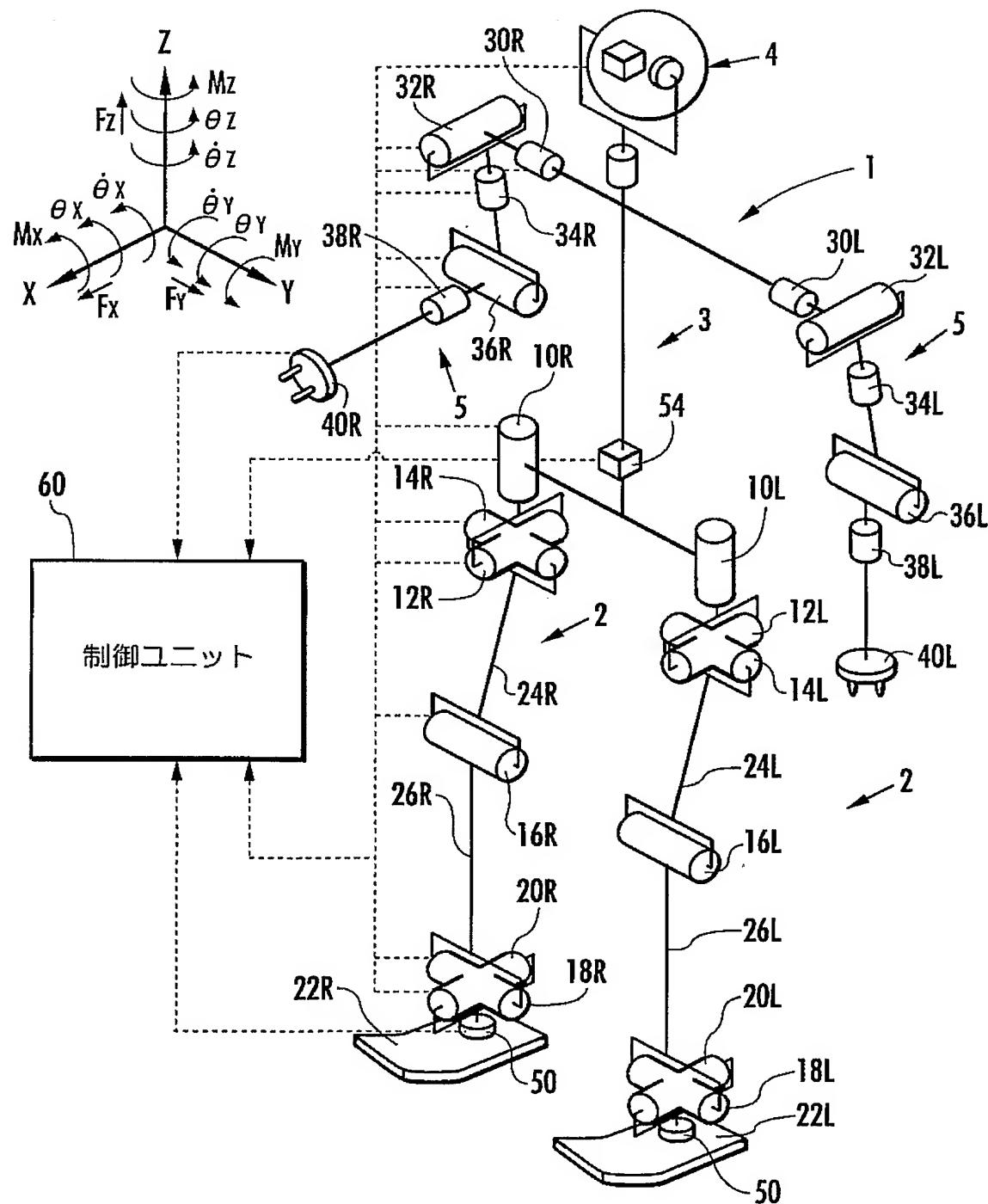
【符号の説明】

【0171】

1…2足移動ロボット、100…歩容生成装置。

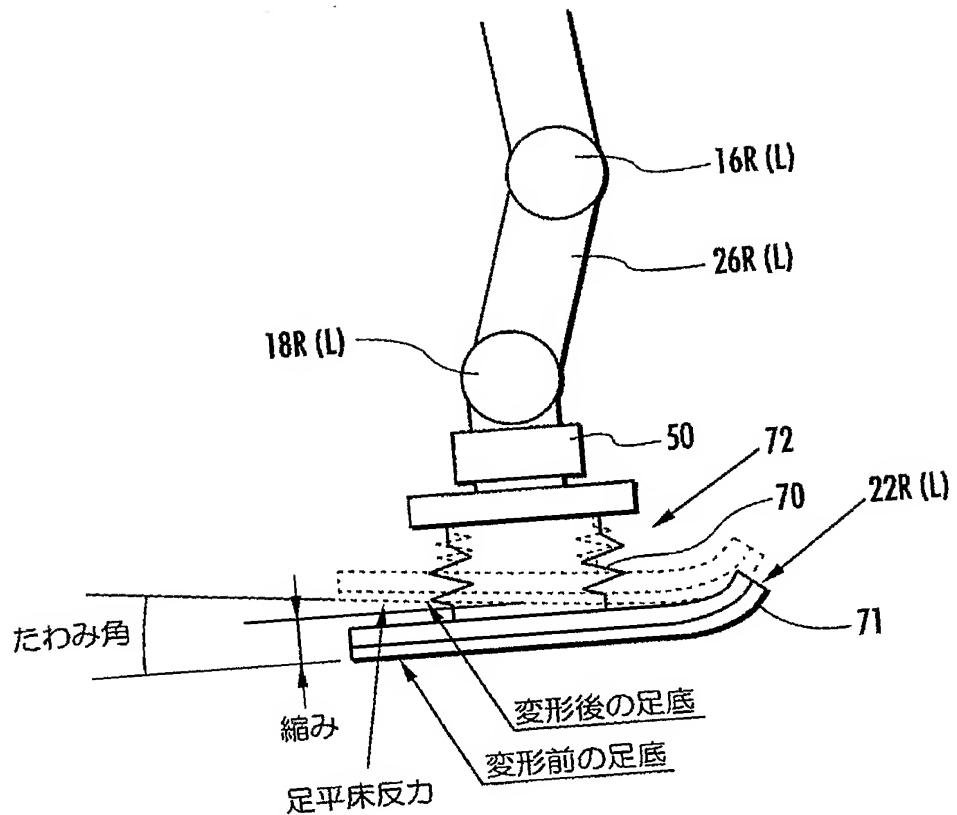
【書類名】図面
【図 1】

FIG.1



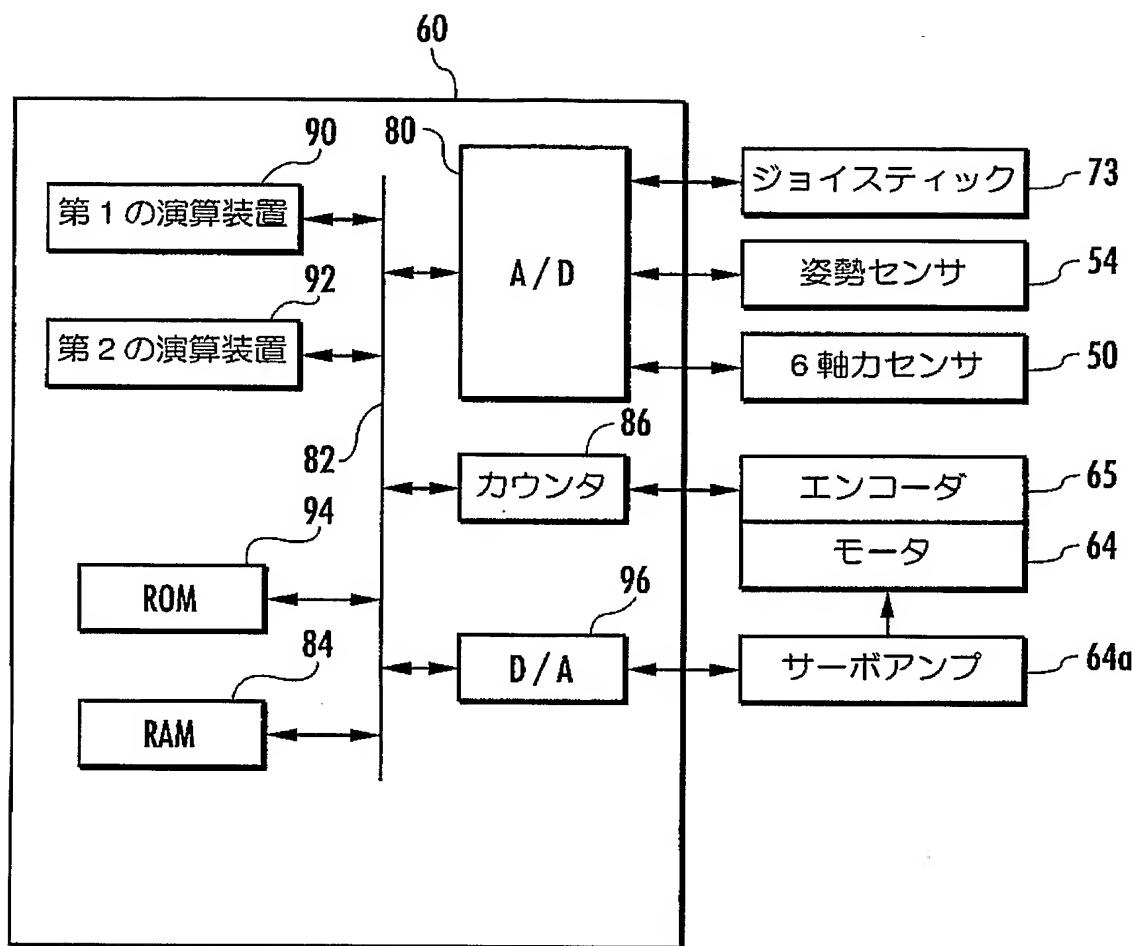
【図2】

FIG.2

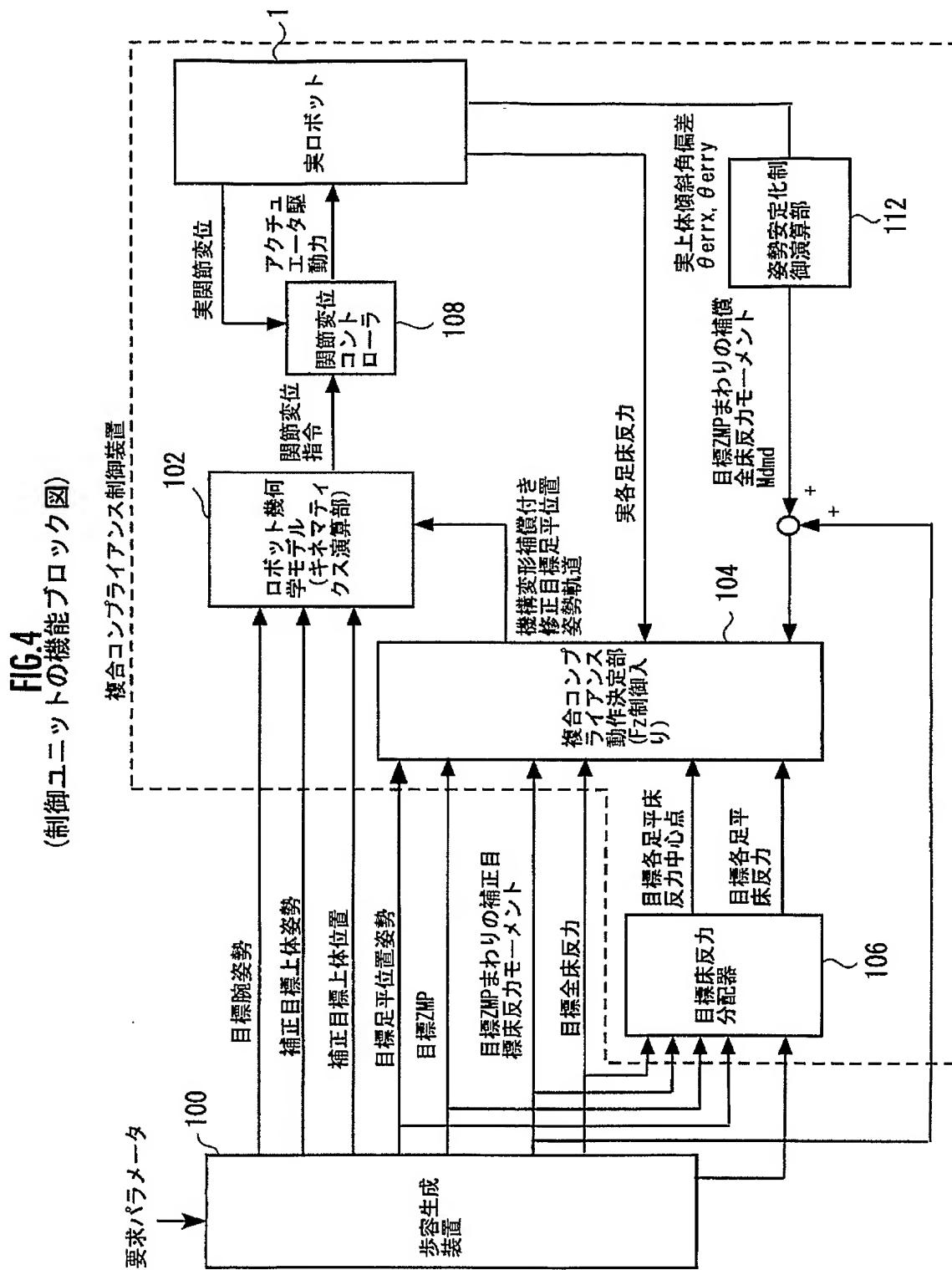


【図3】

FIG.3

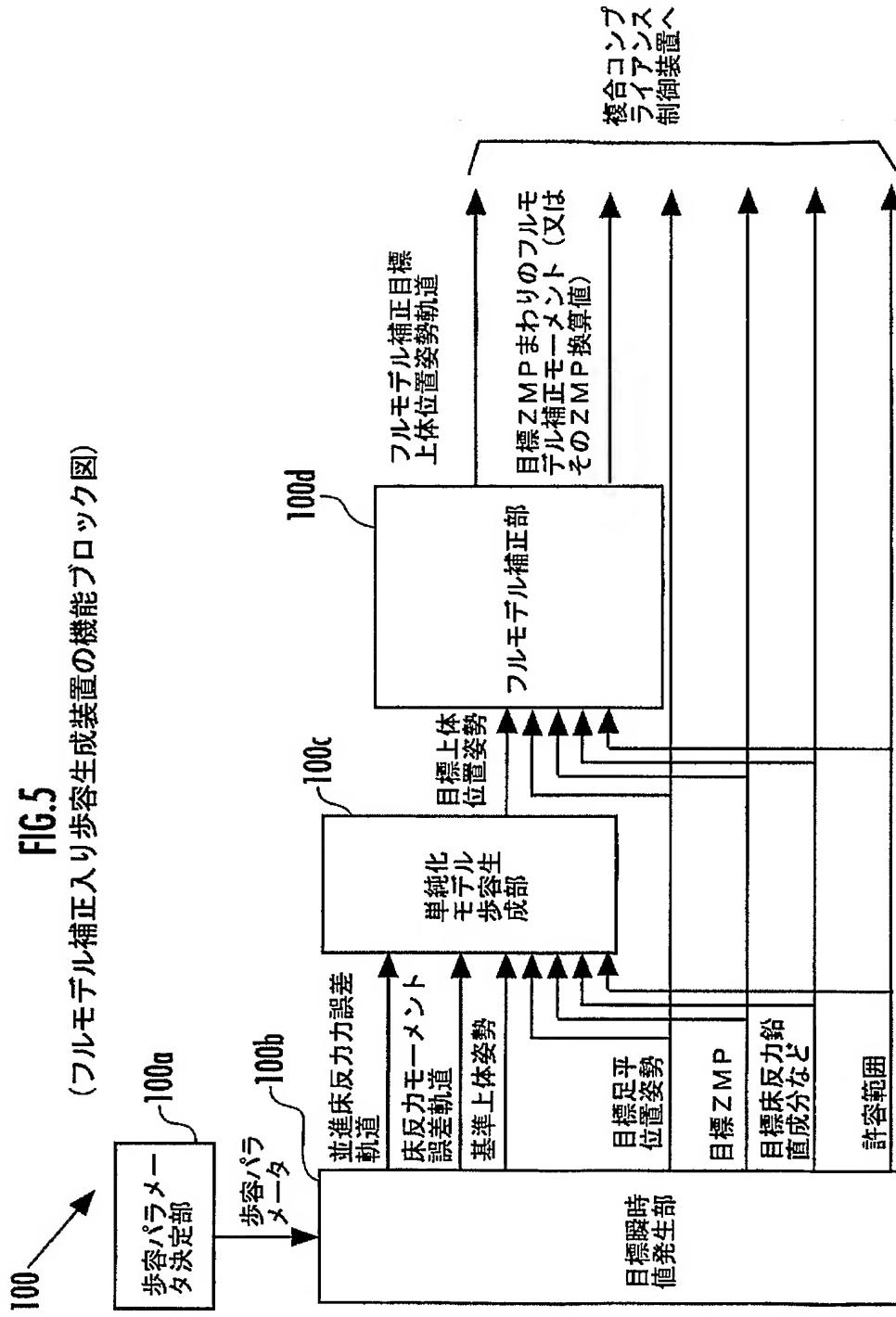


【図 4】

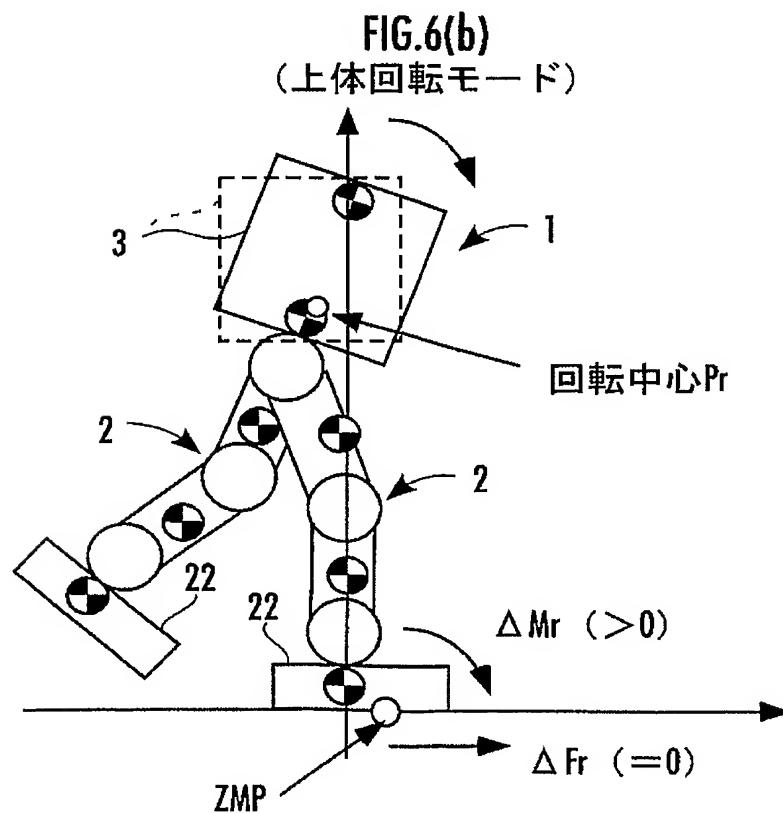
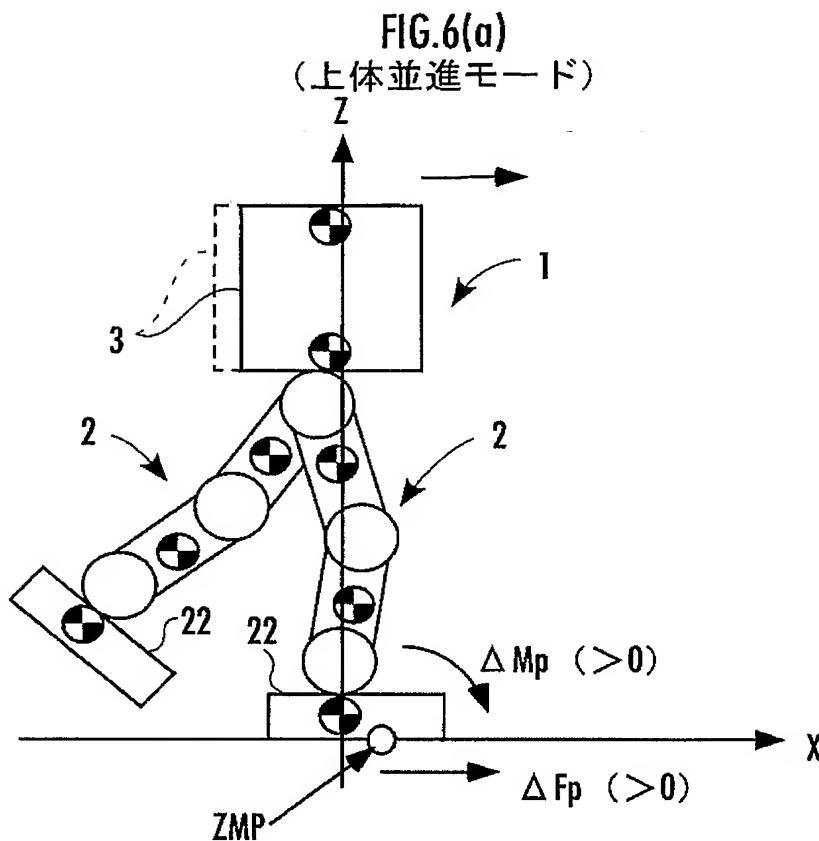


【図5】

FIG.5
(フルモデル補正入り歩容生成装置の機能ブロック図)

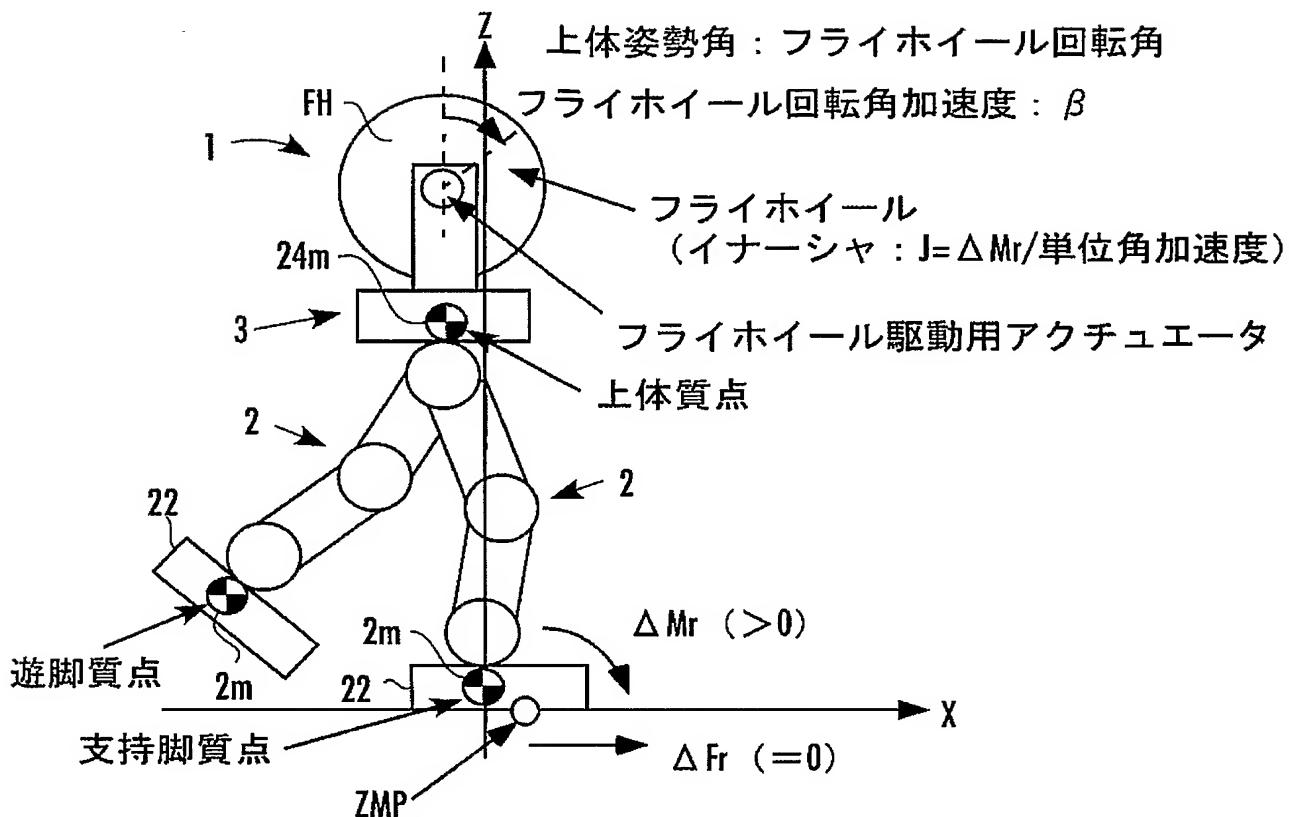


【図 6】

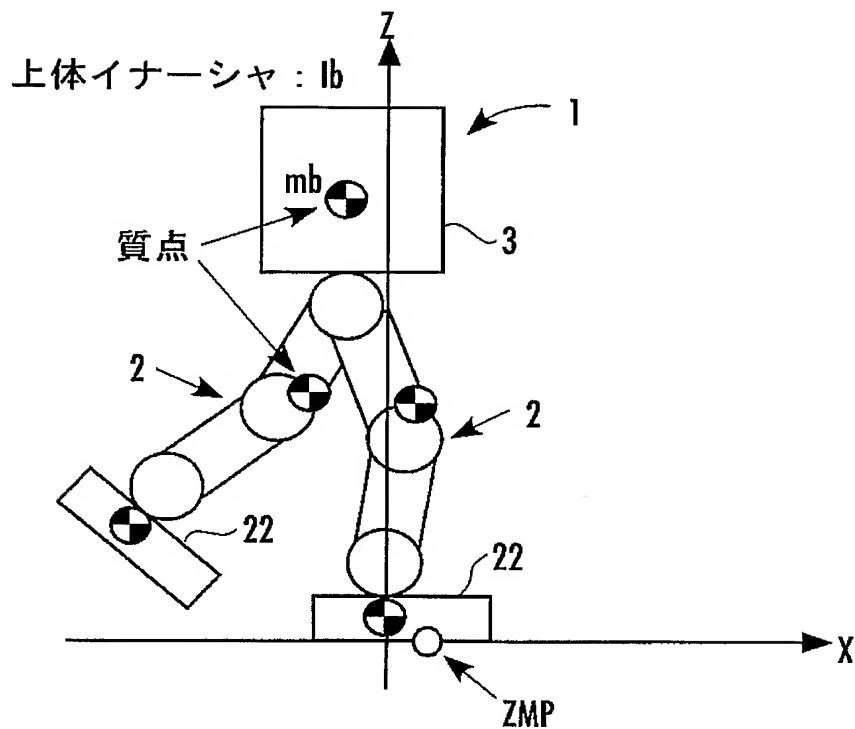


【図7】

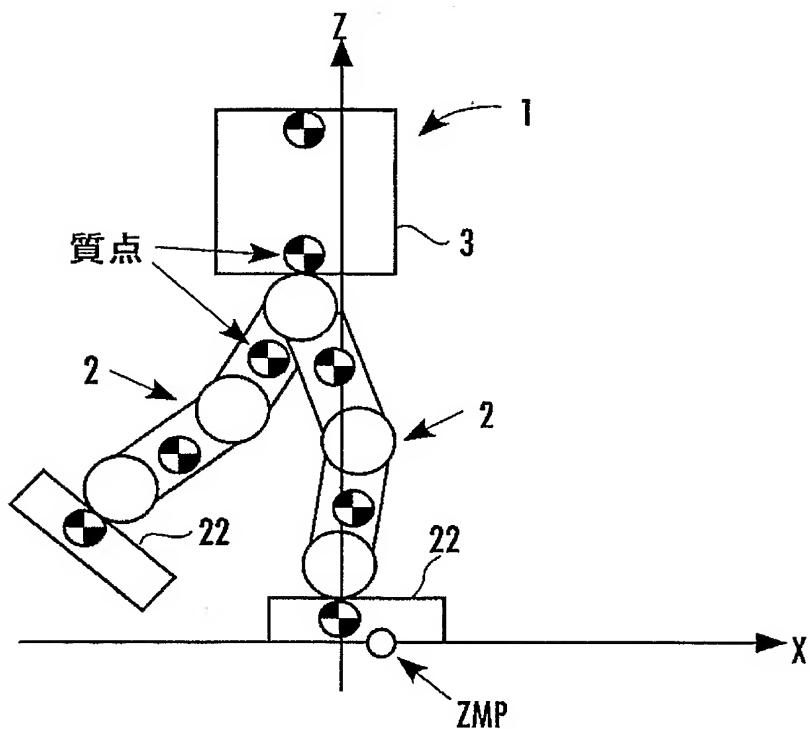
FIG.7
(単純化モデル)



【図8】

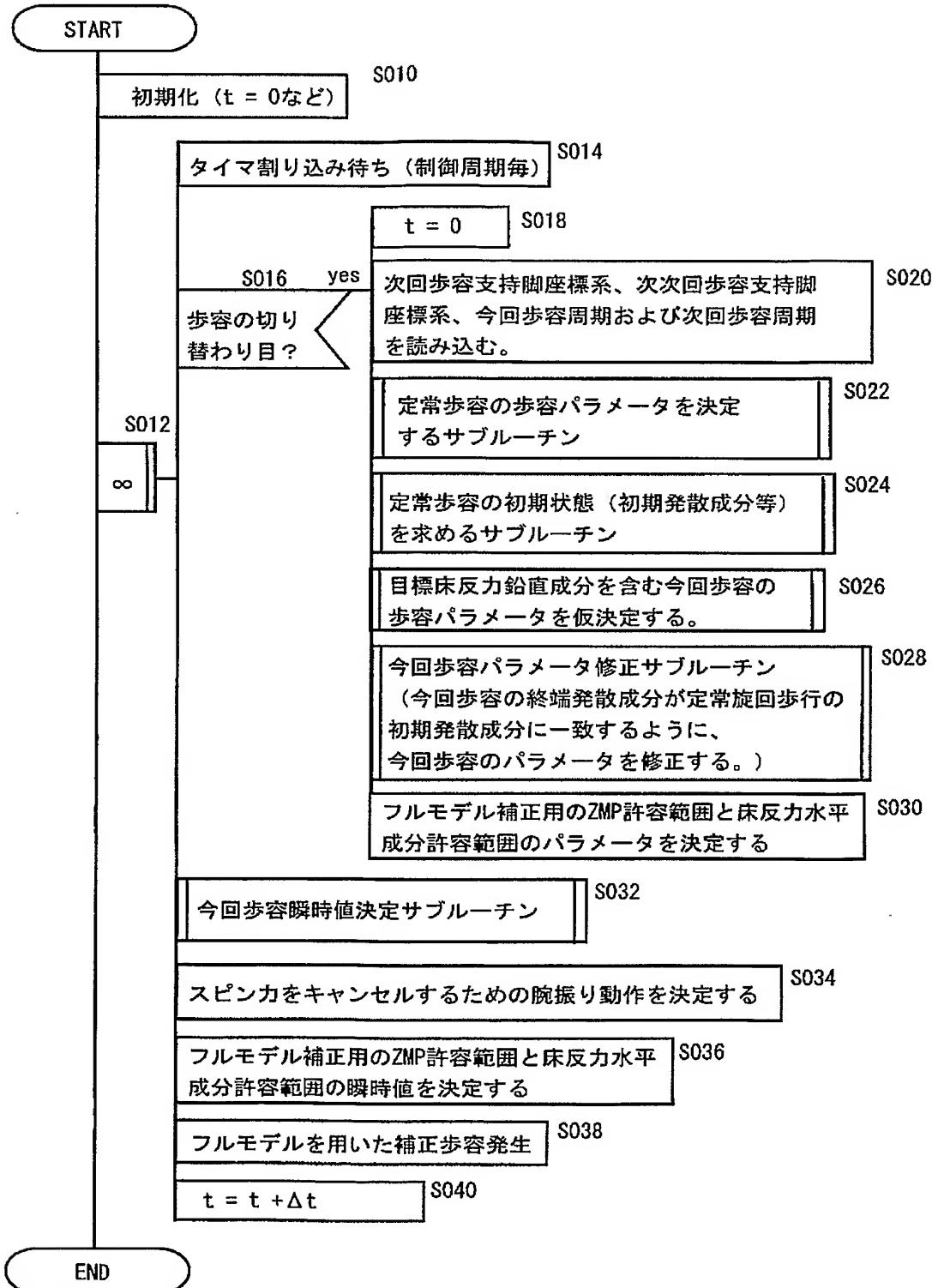
FIG.8
(セミフルモデル)

【図9】

FIG.9
(フルモデル)

【図10】

FIG.10
(歩容生成処理のフローチャート)

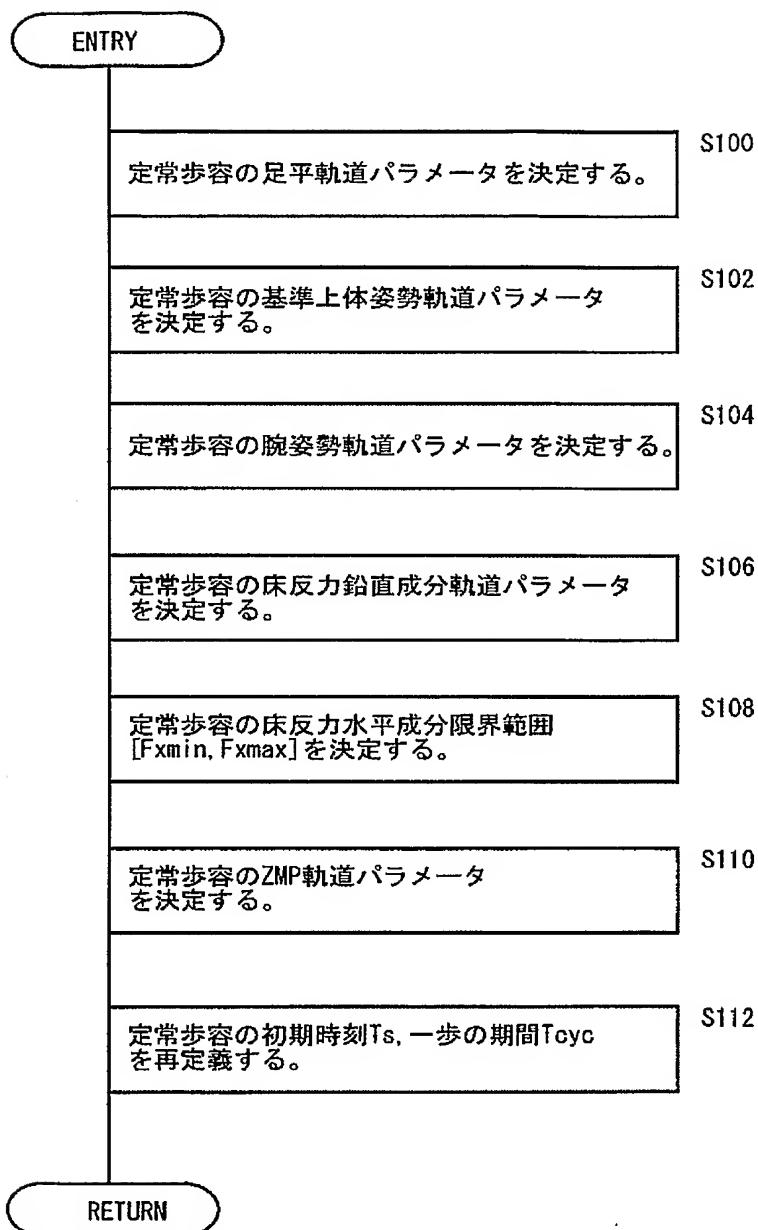


【図11】

FIG.11

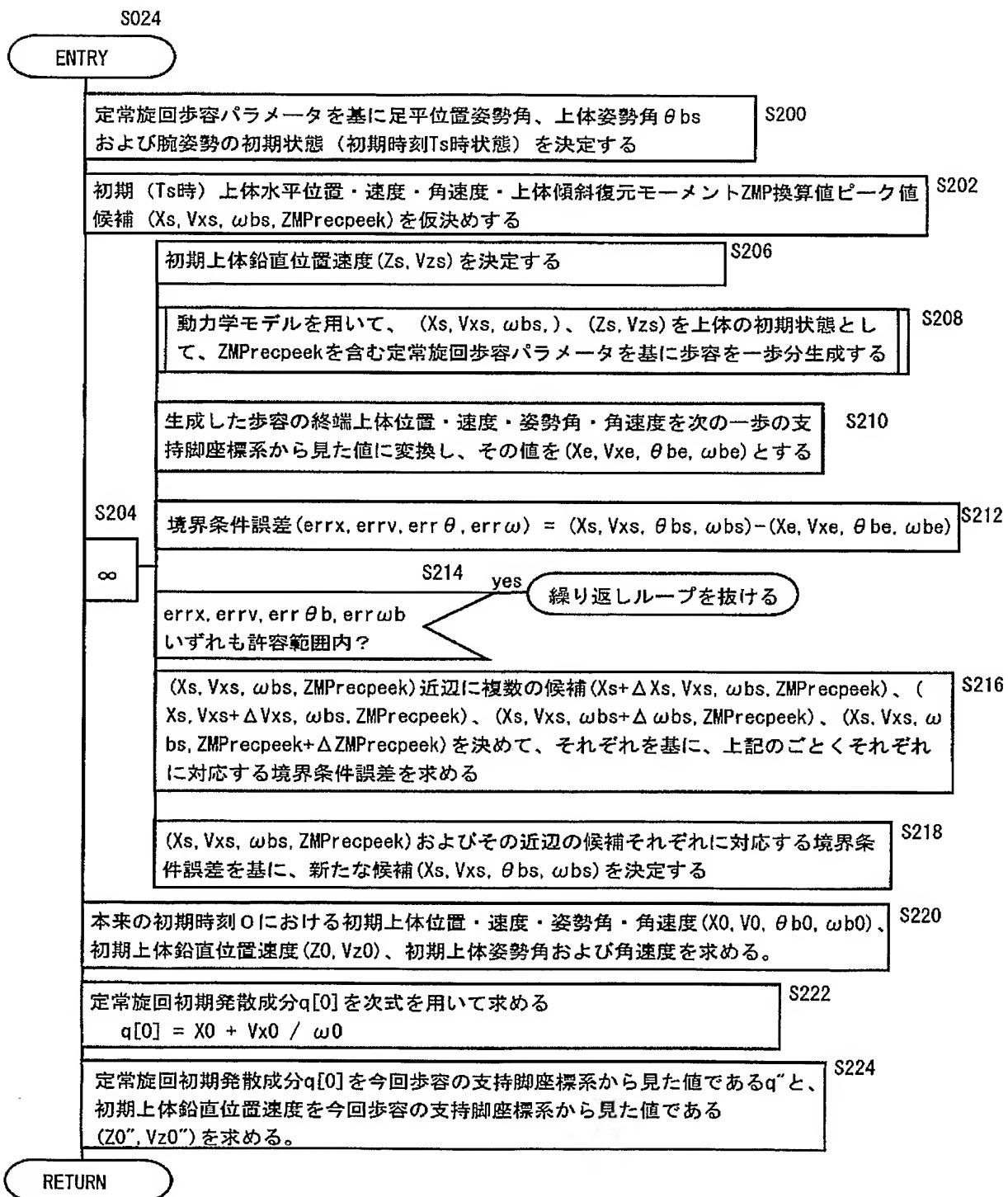
(定常歩容パラメータの決定処理)

S022



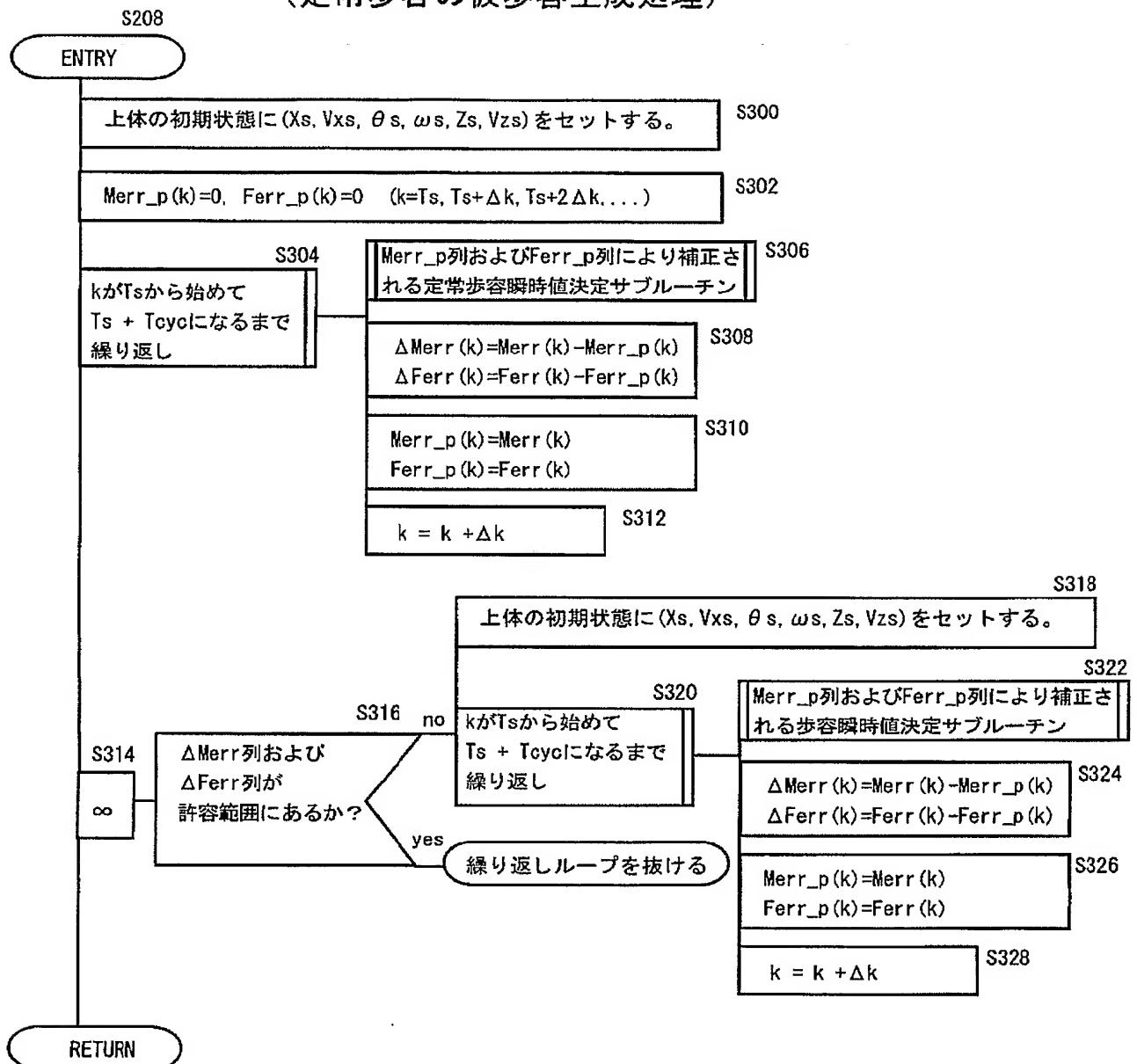
【図 12】

FIG.12
(定常歩容の初期発散成分の探索処理)



【図 13】

FIG.13
(定常歩容の仮歩容生成処理)



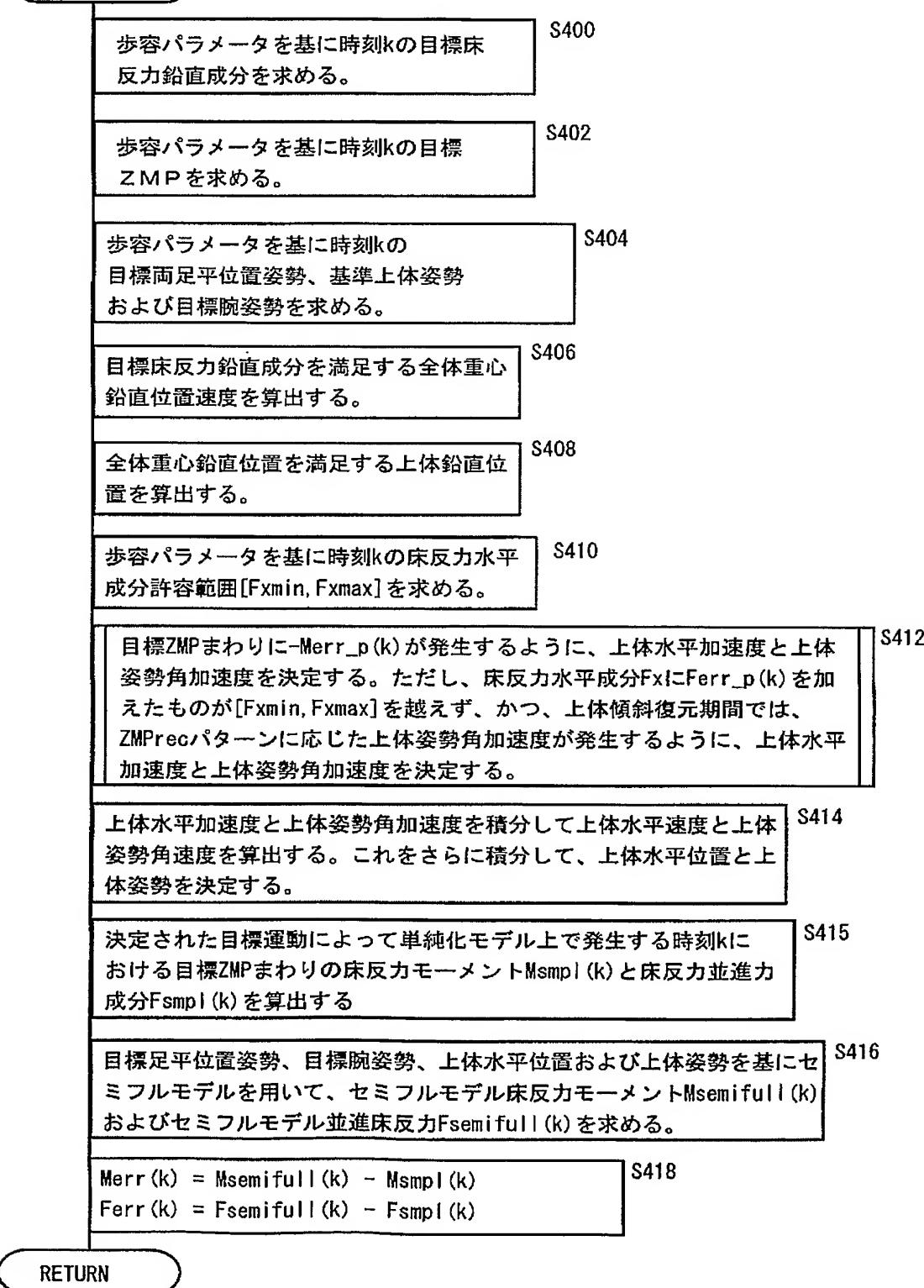
【図 14】

FIG.14

(定常歩容・今回歩容瞬時値決定処理)

S306 or S322 or S032

ENTRY

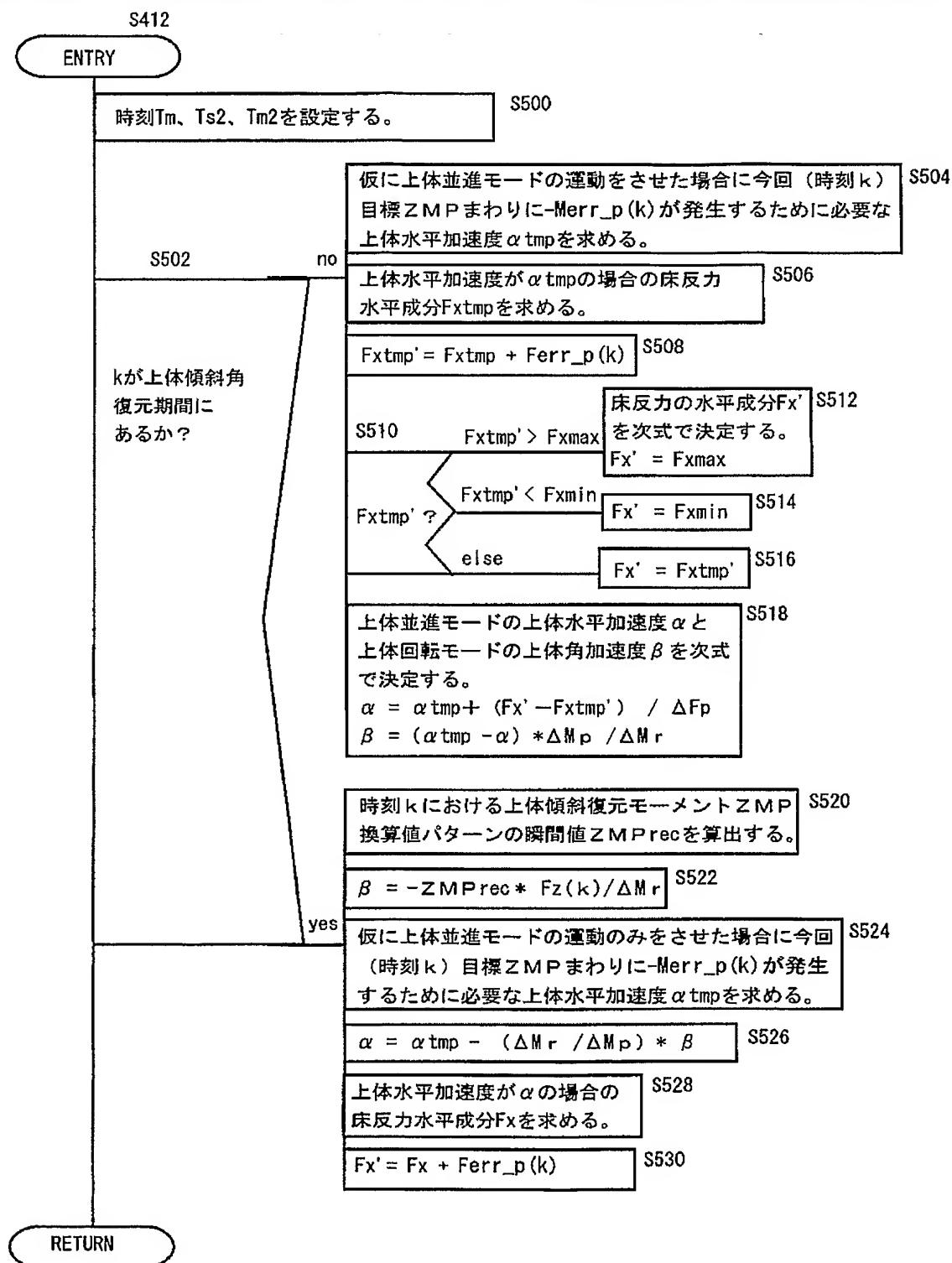


RETURN

【図 15】

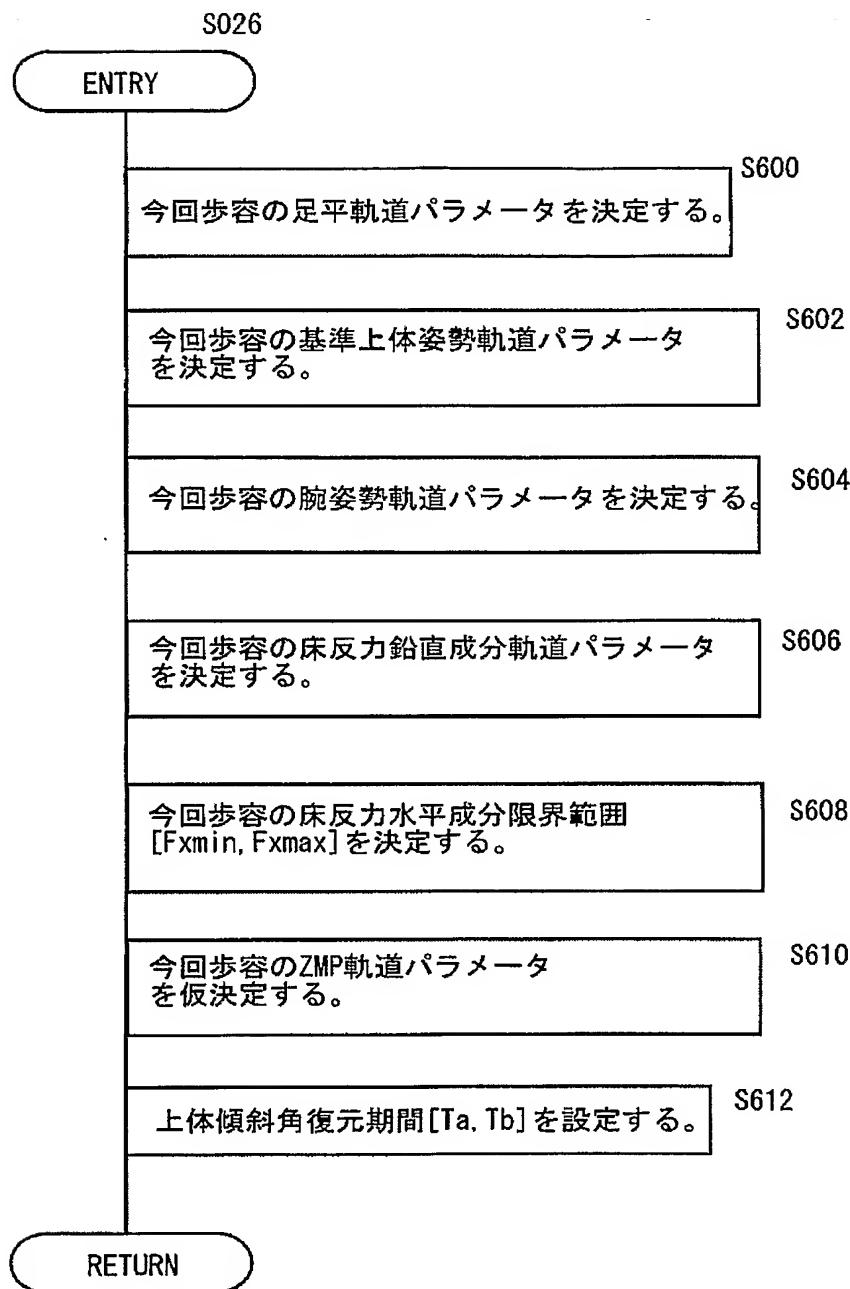
FIG.15

(定常歩容・今回歩容の上体水平加速度／上体姿勢角加速度決定処理)



【図16】

FIG.16
(今回歩容パラメータの仮決定処理)



【図17】

FIG.17

(探索的な今回歩容パラメータの修正処理)

S028

ENTRY

ZMP修正パラメータ候補aと上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク候補 (ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb) を仮決定する。

S700

今回歩容の仮決定処理で仮決めしたZMPパラメータをZMP修正パラメータ候補aによって修正したパラメータと上体傾斜復元モーメントZMP換算値ピーク候補 (ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb) 、およびその他の今回歩容パラメータを基に、終端時刻まで仮今回歩容を計算する。

S704

今回歩容終端での上体位置速度 (Xe, Ve) から、終端発散成分q0[k]を次式を用いて求める。

$$q0[k] = Xe + Vxe / \omega_0$$

S706

終端発散成分誤差errqを次式を用いて求める

$$errq = q0[k] - q''$$

S708

終端上体傾斜角誤差 θ_{berr}
 $=$ 定常歩容初期上体傾斜角 - 今回歩容終端上体傾斜角
 終端上体傾斜角速度誤差 ω_{berr}
 $=$ 定常歩容初期上体傾斜角速度 - 今回歩容終端上体傾斜角速度

S710

S702

∞

S710

yes

繰り返しループを抜ける

errq, θ_{berr} , ω_{berr} いずれもが許容範囲内？

S712

(a, ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb) 近辺に複数の初期値候補 (a+ Δ a, ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb) 、 (a, ZMPrecpeeka+ Δ ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb) 、 (a, ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb+ Δ ZMPrecpeekb) を決めて、それぞれを基に上記のごとくそれぞれに対応する誤差を求める。

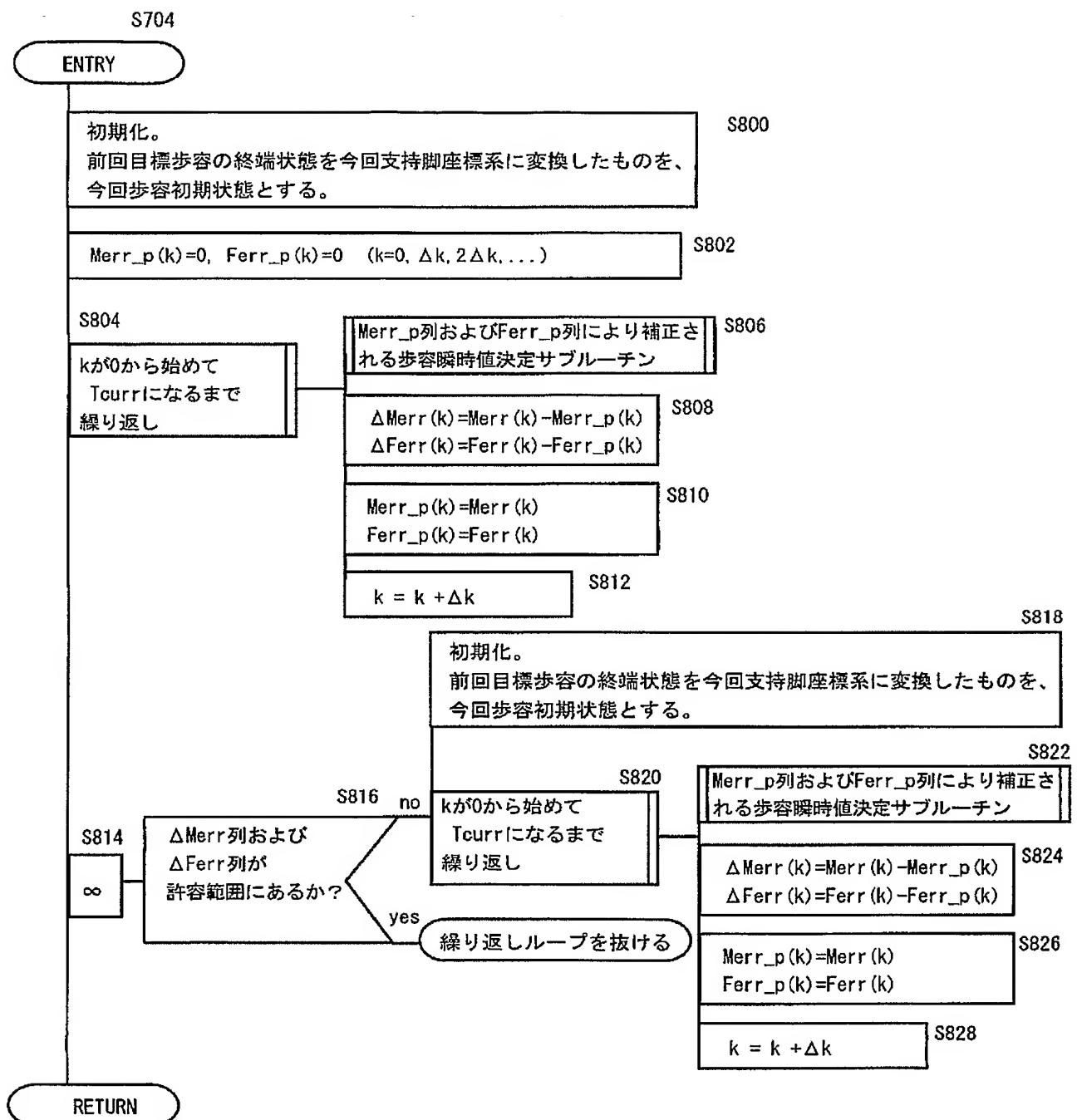
S714

(a, ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb) およびその近辺の初期値候補それぞれに対応する誤差を基に、新たなパラメータ候補 (a, ZMPrecpeeka, ZMPrecpeekb) を決定する。

RETURN

【図18】

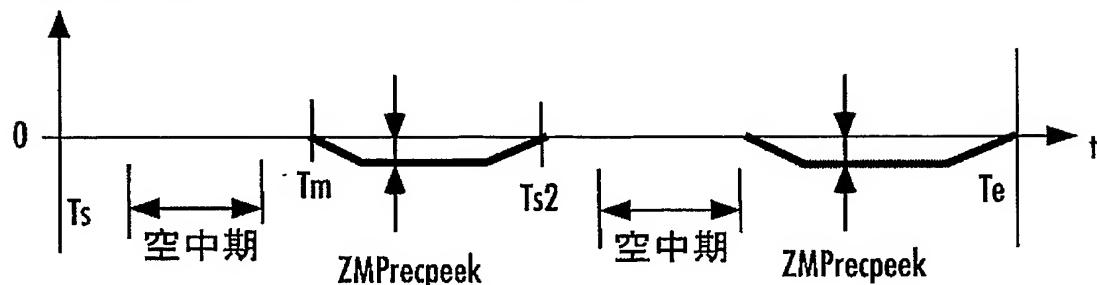
FIG.18
(仮今回歩容生成処理)



【図 19】

FIG.19
(定常歩容のZMPrecpeakの図)

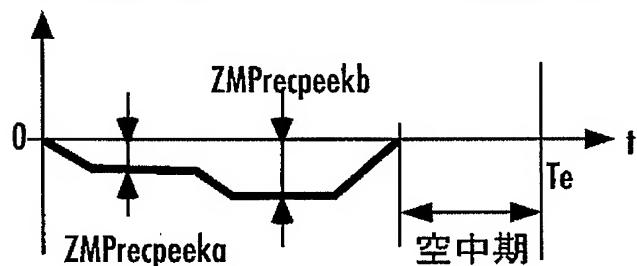
上体傾斜復元モーメントZMP換算値 (ZMPrec)



【図 20】

FIG.20
(今回歩容のZMPrecpeak_a,ZMPrecpeak_bの図)

上体傾斜復元モーメントZMP換算値 (ZMPrec)

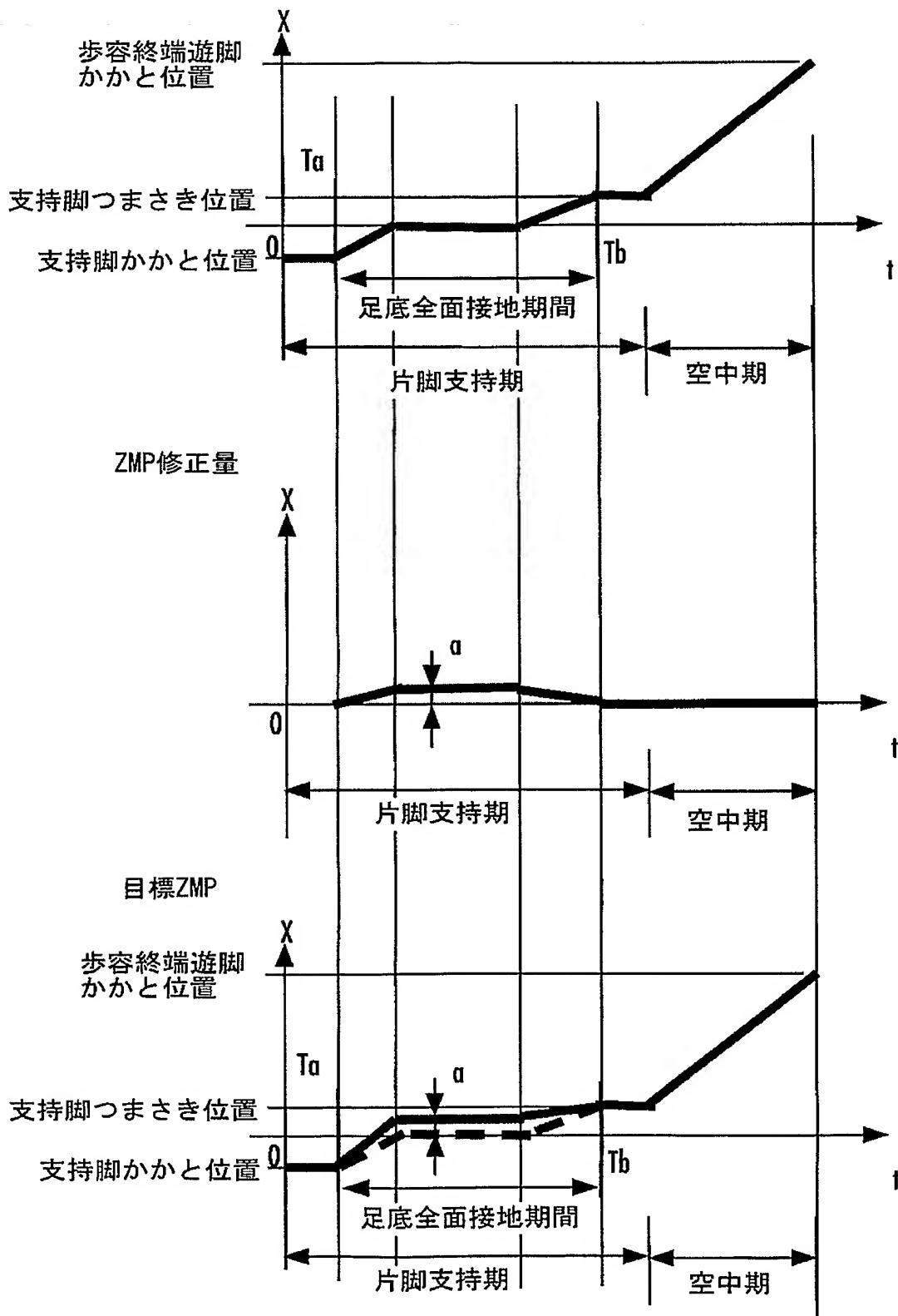


【図 21】

FIG.21

仮目標ZMP

(目標ZMPの修正)



【書類名】要約書

【要約】

【課題】ロボットのスリップを防止し得る歩容を、動力学的精度を確保しつつ効率よく生成する。

【解決手段】

第1の動力学モデルを用いて、床反力モーメントの目標値などの動力学的条件を満足する所定期間分の目標運動を仮生成する。仮生成した運動と第2動力学モデルとを基に瞬時瞬時の床反力並進力成分誤差および床反力モーメント成分誤差を算出する。これらの成分誤差の時系列が0に近づくように目標歩容の運動を修正する。

【選択図】図13

特願 2004-052823

出願人履歴情報

識別番号 [000005326]

1. 変更年月日 1990年 9月 6日

[変更理由] 新規登録

住所 東京都港区南青山二丁目1番1号
氏名 本田技研工業株式会社